

LA GRAN AVENTURA DEL CRISTAL

**Naturaleza y evolución
de la ciencia de los cristales**

José Luis Amorós



LA PRESENTE EDICIÓN

La primera versión de esta gran aventura fue escrita en inglés, posiblemente durante los años que José Luis Amorós vivió en Estados Unidos. Sin embargo, nunca llegó a publicarse en este idioma. Nos queda de ella un enorme volumen mecanografiado al que sólo le faltan algunas citas bibliográficas para estar completo. Cuando Amorós regresó definitivamente a España, en 1974, debió de cambiar sus planes con respecto al libro y decidió publicarlo en castellano. En 1978 salió a la luz la primera y única edición de “La gran aventura del cristal”, a través de la Editorial Complutense, hoy desaparecida. Esta edición se agotaría poco más tarde, quedando la fascinante historia narrada por Amorós en manos de los pocos que tuvimos la fortuna de adquirir el libro a tiempo. La obra ha estado expuesta a caer en el olvido durante estos últimos casi cuarenta años hasta que en 2014, con motivo del Año Internacional de la Cristalografía, un grupo de amigos y antiguos alumnos del profesor Amorós nos pusimos a trabajar para hacer posible esta nueva edición de “La gran aventura del cristal”.

La transcripción se ha llevado a cabo tratando de respetar en la medida de lo posible la versión original. El resultado es casi un facsímil que hemos intentado mejorar ligeramente, corrigiendo erratas, recolocando figuras y añadiendo una relación bibliográfica completa que permite consultar cómodamente las obras citadas en el texto. El formato de dicha bibliografía se ajusta al estilo Harvard, aunque tomándonos algunas licencias que, a nuestro juicio, añaden valor a esta recopilación, como añadir el nombre

completo de los autores o la localización de algunos ejemplares citados. Además se ha añadido el prólogo que no tuvo la primera edición y por último, se ha sustituido la antigua portada por una nueva.

Queremos agradecer el apoyo que nos han prestado la Facultad de Ciencias Geológicas, la Universidad Complutense de Madrid y, muy especialmente, queremos agradecer a D. Juan Ignacio Rived Canut/Amorós que diera su permiso para sacar adelante este proyecto.

Transcripción y maquetación:

Isabel López Valero y Carlos Manuel Pina

Correctores:

Isabel López Valero, Carlos Manuel Pina, Manuel Prieto y Pedro Tavira.

Bibliografía:

Sol López Andrés y M^a Victoria Romero.

Prólogo:

Juan Manuel García Ruiz.

Foto de portada:

Toya Legido.

Romboedro de exfoliación de calcita.

Museo de la Geología, Facultad de Ciencias Geológicas, UCM.

Coordinación de la edición:

Victoria López-Acevedo.



PRÓLOGO

En un país tan poco dado a celebrar los logros y virtudes del prójimo, incluso cuando no nos queda más remedio que admirarlo, este libro que se dispone a leer es una saludable iniciativa. Porque éste es un libro editado para reconocer en el coro de los científicos la obra de un maestro por parte de un puñado de colegas que nos consideramos influidos por su obra y especialmente por su forma de hacer ciencia. Pero sobre todo se hace para dar a conocer al gran público una obra de divulgación extraordinaria que estaba oculta en la insondable biblioteca de los libros descatalogados. Es un libro que se reedita, en el marco del Año Internacional de la Cristalografía, en homenaje al que fuera catedrático de Cristalografía y Mineralogía de la Universidad Complutense, José Luis Amorós Portolés.

José Luis Amorós es una de las grandes figuras de la Cristalografía española de todos los tiempos y de nuestra ciencia en general. Un científico de talla internacional en cuanto a sus contribuciones de carácter técnico que no voy aquí a reseñar porque no cabe el esfuerzo pero que me gustaría demostrar con una simple anécdota. Durante mi estancia postdoctoral en la Universidad Estatal de Pensilvania tuve la necesidad de ir a Washington. Esa universidad es bien conocida porque es una de las diez

mejores universidades de Estados Unidos, y también por estar “en el medio de ninguna parte”, es decir, mal comunicada. Una estudiante de doctorado se ofreció a llevarme en su coche y allá que nos fuimos rumbo este a través de los Alleghenies. La estudiante de doctorado cargaba con unos pocos libros de texto en el asiento trasero del coche. Entre ellos uno de Amorós, “*Molecular crystals*” publicado por John Wiley and Sons en colaboración con su esposa María Luisa Canut pero que firmaron al estilo anglosajón como Amorós J.L. & Amorós M.L.. “Ese libro lo escribió mi director de tesis”, le dije. “Really?” Contestó incrédula. “Your Spanish supervisor?”. Se pueden imaginar lo orgulloso que hice el resto del viaje. Créanme, pues, cuando les digo que estamos hablando de una figura de talla internacional.

José Luis Amorós escribió muchos artículos y libros. Su producción puede consultarse en el cuidado inventario que Victoria López-Acevedo y Sol López Andrés publicaron en la revista Macla en 2004. De entre todos sus libros hemos elegido para este homenaje uno de ellos –desde hace años agotado- llamado “*La gran aventura del cristal*” y subtitulado “*Naturaleza y evolución de la ciencia de los cristales*”. La elección no fue difícil y está más que justificada. En primer lugar porque es un guiño a la especial atención que nuestro maestro dedicaba a la historia y epistemología de la ciencia, una dedicación que inculcó en muchos de nosotros o que fomentó en otros que ya la teníamos. Desde aquella primera nota sobre la historia de la Cristalografía y la Mineralogía publicada en 1959 en el Boletín de la Real Sociedad Española de Historia Natural, fueron muchas las notas y artículos dedicados a indagar la forma en que se produjeron los

descubrimientos científicos. Él creía que la historia de la ciencia es ciencia, que estudiar las grandes contribuciones de los predecesores era la mejor forma de entender la ciencia y de aprender a practicarla, especialmente en un país como el nuestro, con tan poco bagaje científico. Y a la vez era la mejor manera de enamorarse irreversiblemente de la magia que esconde la investigación científica, que es al fin y al cabo lo que nos enseñó el Profesor Amorós a sus discípulos. En segundo lugar, era casi obligado elegir este libro porque fue y sigue siendo el mejor libro de historia de la Cristalografía y de la Mineralogía que tenemos en España. Se editó por primera y única vez en 1978 en español por la Editorial de la Universidad Complutense. Agotado desde hace años, el que este libro no haya sido nunca reeditado retrata muy bien el penoso panorama de la edición científica en España, y pone en entredicho el tipo de divulgación científica que más se fomenta en estos días, demasiado henchida de aspavientos y diseño y demasiado pobre de contenido. Pero fundamentalmente la elección de esta obra nos sirve para demostrar una vez más la altura científica, el mérito intelectual y la modernidad de las contribuciones del Profesor Amorós.

Hace tan solo un par de años, en 2012, Bart Kahr y Alexander G. Shtukenberg se quejaban del pobre panorama de la Historia de la Ciencia, y de la Cristalografía en particular, con el siguiente texto: “There are at least six book length biographies of Herman Melville (1819-1891) and ten histories of the Russian Revolution currently in print in the English language. On the other hand, if you chase after crystals not whales, or believe that the determination of the structure of matter was a historical pivot, you will be disappointed that

there does not exist a single narrative history of crystallography in print in English or any other language to the best of our knowledge. By any measure, crystallography now receives scant attention by historians and scholars”.

No les falta razón. La Cristalografía cuenta con las historias escritas a principios del siglo XX por Paul von Groth en alemán, por Alfred Tutton en inglés y por Hélène Metzger en francés. La breve historia de la Cristalografía de rayos X publicada por P. Ewald en 1960 es obviamente un trabajo demasiado técnico para tener trascendencia fuera de nuestra disciplina, como lo es aún más el singular atlas histórico publicado por Lima de Faria en 1990. No nos olvidamos de la obra de John Burke, una obra publicada en 1966 que es fundamentalmente una historia apologética del abad Haüy, enmarcada en los orígenes de la Cristalografía y que se restringen a esa época. El trabajo de Barth y Alexander está precisamente dedicado a recibir como novedades los dos volúmenes de Ilarion Shafranovskii escritos en ruso en 1978 y 1980, respectivamente, incluyendo la impagable traducción de una pequeña parte de esta excelente contribución a la Historia de la Cristalografía. Y finalmente tenemos el trabajo mucho más reciente de Curtis P. Schuh, un intento enciclopédico pero inacabado, un conjunto de notas históricas, accesible en internet en su edición preliminar de 2007.

Bart y Alexander concluyen y lamentan que no haya sido publicada una sola historia narrativa de la Cristalografía en inglés o cualquier otro idioma. Se equivocaban. La había y a partir de hoy la vuelve a haber. Es precisamente la que se cuenta en este libro *“La gran aventura del cristal”*. El texto

que reeditamos es exactamente esa historia que echan en falta nuestros dos colegas norteamericanos. *La gran aventura* es una historia casi novelada, es un paseo bien narrado por la historia de la ciencia de los cristales, desde sus orígenes en Grecia hasta el descubrimiento de la difracción de los rayos X. Es buena literatura que a la vez incorpora un sesudo análisis histórico, bien fundado aunque a veces se eche en falta las citas de algunas fuentes. Y es una obra original. Nótese que *La gran aventura del cristal* se publica en 1978, el mismo año en que se publica el primero de los dos volúmenes de Shafranovskii, que llega solo hasta principios del XIX. Es posterior a Burke, pero inmensamente más erudito y ambicioso en el tiempo y en la profundidad. Es más, Sol López Andrés y Victoria López Acevedo han descubierto que *La gran aventura del cristal* es de hecho una traducción de un manuscrito anterior escrito en inglés, una versión extendida y mejorada de un intento inicial, nunca acabado ni editado, escrito por Amorós con anterioridad a 1978. Ese manuscrito -del que se conserva copia- lo debió de escribir Amorós al final de su etapa norteamericana de once años en la Southern University of Illinois, es decir antes de regresar a la Universidad Complutense en 1975. Por razones que no conocemos, Amorós decide traducir el manuscrito inacabado al español y terminar la obra en este idioma para publicarla en la Editorial Complutense.

Créanme también que no ha sido fácil lograr editar *La gran aventura del cristal*. Lo que debería de haber sido el mayor escollo, el permiso de Juan Ignacio Rived Canut/Amorós, heredero de los derechos de autor, fue lo más sencillo de conseguir. A partir de ahí, multitud de trabas y problemas administrativos y legales derivados de los extravagantes

contratos de las editoriales de las instituciones públicas españolas, y no menos problemas técnicos derivados de que unos científicos se decidieran a editar por su cuenta. Pero no sabían que somos muy tercos. Y aquí la tienen. Que disfruten de la aventura.

Juan Manuel García-Ruiz

Amorós, José Luis. Notas sobre la historia de la Cristalografía y Mineralogía I. La controversia Haüy-Mitscherlich. *Boletín de la Real Sociedad Española de Historia Natural. Sección Geológica*, **1950**. 57: 5-30

Amorós, José Luis y Canut, María Luisa. *Molecular crystals; their transforms and diffuse scattering*. New York: Wiley. **1968**. XXI, 479 p., il., 23 cm.

Burke, John G. *Origins of the science of crystals*. Berkeley: University of California Press. **1966**. 198 p., il., 25 cm.

Ewald, Peter Paul. *Fifty years of X-ray diffraction*. Dedicated to the International Union of Crystallography on the occasion of the commemoration meeting in Munich, July 1962. Utrecht: International Union of Crystallography. A. Oosthoek's Uitgeversmij (Ed.). **1962**. IX, 720 p., il., 25 cm.

Groth, Paul Heinrich von. *An Introduction to Chemical Crystallography*. London: Gurney & Jackson. **1906**. VII, 123 p., 20 cm.

Groth, Paul Heinrich von. *Entwicklungsgeschichte der mineralogischen Wissenschaften*. Berlín: Verlag von Julius Springer. **1926**. IV, 261 p., 25 cm.

Kahr, Bart y Shtukenberg, Alexander Grigor'evich. *Histories of Crystallography by Shafranovskii and Schuh. Recent Advances in Crystallography.* Jason B. Benedict (Ed.). Published under CC BY 3.0 license. **2012**.

Lima de Faria, José. *Historical atlas of crystallography.* Boston: International Union of Crystallography por Kluwer Academic Publishers. **1990**. X, 158 p., il., 31 cm.

López-Acevedo, Victoria y López Andrés, Sol. José Luis Amorós Portolés: vida y obra. *Macla*, **2004**, 1, 85-92.

Metzger, Hélène. *La genèse de la science des cristaux.* Nouveau tirage. Paris: A. Blanchard. **1969**. 248 p., 28 cm.

Schuh, Curtis P. *Mineralogy & Crystallography: on the history of these sciences from beginnings through 1919.* Tucson: AZ. **2007**. 561 p.

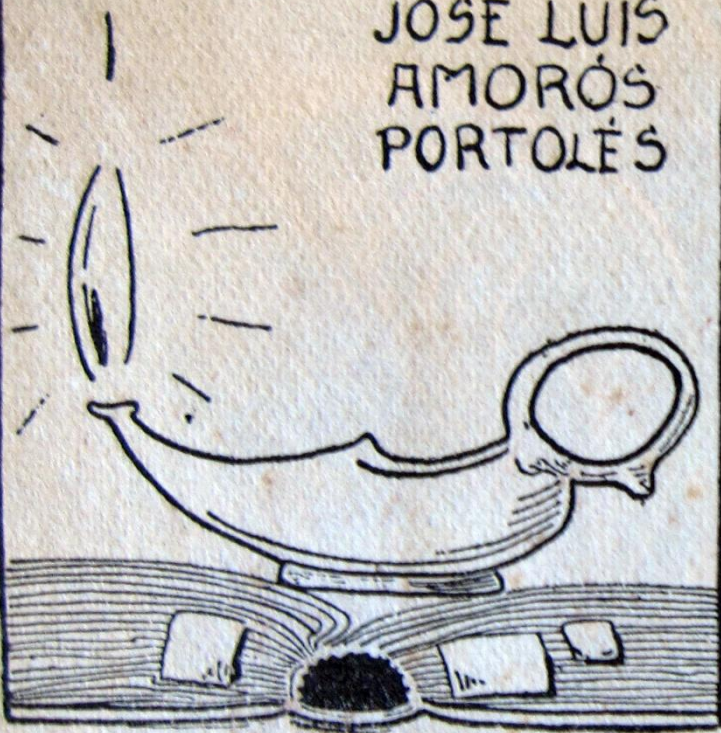
Shafranovskii, Ilarion Ilarionovich. *The History of Crystallography. Vol. I. From Ancient Times to the Beginning of the Nineteenth Century.* (In Russian). Leningrad: Nauka. **1978**. 295 p., il., 22 cm.

Shafranovskii, Ilarion Ilarionovich. *The History of Crystallography. Vol. II. The Nineteenth Century.* (In Russian). Leningrad: Nauka. **1980**. 323 p., il., 22 cm.

Tutton, Alfred Edwin Howard. *The Natural History of Crystals.* London: Kegan Paul, Trench, Trübner & Co. Ltd. **1924**. XII, 287 p., il., XXXII pl., 23 cm.

EX·LIBRIS

JOSÉ LUIS
AMORÓS
PORTOLÉS



La gran aventura del cristal

© José Luis Amorós, 1978
© Editorial de la Universidad Complutense de Madrid

La gran aventura del cristal

NATURALEZA Y EVOLUCION
DE LA CIENCIA DE LOS CRISTALES

por José Luis Amorós



EDITORIAL DE LA UNIVERSIDAD COMPLUTENSE

INTRODUCCIÓN

El hombre ocupa en el mundo físico una posición intermedia entre dos órdenes de magnitud extremos: lo inmensamente grande, el universo, y lo inmensamente pequeño, el mundo de las partículas. Es quizás inherente a la naturaleza humana el verse atraído por lo grande, pues esto le lleva a considerar el infinito y con ello saciar sus ansias de abarcar y trascender que todo ser humano posee. Por esta razón, el conocimiento del universo le atrajo desde el principio, y por ello las teorías astronómicas no sólo interesaron a los hombres de ciencia, sino que tuvieron trascendencia e influencia en la mente de todos, quizás por este eterno preguntarnos de dónde venimos, dónde vivimos y a dónde vamos. El conocimiento del universo nos proporciona no sólo una respuesta parcial a estas preguntas, sino que satisface la necesidad de alcanzar aquello que está fuera de nuestro alcance. Es por esta razón que las ideas del macrocosmos han tenido y tienen vigencia general.

Es paradójico que el hombre, ocupando una posición intermedia entre el macrocosmos y el microcosmos, no haya tenido interés en conocer el intrincado mundo del microcosmos. Parece como si lo inmensamente pequeño no le interesase excesivamente. Hoy en día, se acepta la existencia de los átomos e incluso su utilización práctica, la energía atómica. Pero no lo comprende ni parece querer comprenderla. Lo inmensamente pequeño parece escapar a nuestra mente, quizás porque no podemos comprender o analizar de manera

intuitiva el orden de lo pequeño. Frente a lo inmensamente pequeño parece surgir siempre una barrera, la de la teoría, acompañada por una formulación matemática que en general es compleja.

Esta situación debe cambiar, pues las ideas que tenemos del mundo pequeño son tan inteligibles como las ideas del macrocosmos. El orden que admira en éste tiene un paralelo en el microcosmos, y, me atrevería a decir, que el mundo de lo inmensamente pequeño es más sencillo y comprensible que el mismo macrocosmos. Además, desde el punto de vista de la satisfacción por conocer, es quizás mayor la de saber cómo y por qué somos, que conocer nuestra posición en un mundo superior y más extenso al que nunca podremos controlar. El microcosmos es no sólo comprensible, sino controlable, y por tanto su conocimiento es práctico y eficiente.

Dentro del microcosmos, existen también niveles dimensionales, donde prevalecen tipos distintos de orden. Entre estos niveles, es el cristal el que nos proporciona no sólo una visión de un orden, sino que ese mismo orden permite avances en nuestro conocimiento del mundo y de la naturaleza, que no pueden adquirirse de otra manera. El cristal es una realidad donde entendemos las maravillas del mundo atómico de manera directa y precisa.

El mundo de los cristales es, como todo el universo, bello, y sin duda alguna, es de una gran belleza que fácilmente se entiende. Es una belleza que entra por los ojos. Quizás, como veremos más adelante, fue esta belleza la que atrajo a un número de investigadores de todos los tiempos, cautivados por la contemplación de minerales cristalizados. Esta fascinación les llevó a tratar de comprender qué tipo de orden es necesario para que un cristal tenga existencia; de este estudio nació en el transcurso de los tiempos una ciencia basada en el estudio del orden y de la simetría. Este libro trata de esa aventura intelectual, aventura protagonizada por mentalidades excepcionales que fueron atraídas por la maravilla de lo inmensamente pequeño. Estos investigadores geniales idearon una concepción del cristal de extremada belleza y simplicidad, imagen que fue desarrollada gracias a un esfuerzo mental tan importante, al menos, como el que condujo a Newton a la formulación de la teoría de la gravitación universal, o la que llevó a Einstein a su teoría de la relatividad.

Pero nuestros protagonistas no gozan de la popularidad y general conocimiento que caracteriza a las personalidades citadas, o de otras bien conocidas como un Galileo o un Copérnico. En estos últimos casos, la controversia que produjeron sus ideas ha atraído una y otra vez al público y a los escritores. Por el contrario, nada similar se encuentra en relación con los que trabajaron con cristales. Con todo, la historia de los cristales está llena de controversias, tan fundamentales y trascendentales como por ejemplo la que surgió sobre la naturaleza de la luz; o de personajes tan célebres y conocidos como un Pasteur; o de conceptos tan importantes como la anisotropía.

Lo que ha pasado con la ciencia de los cristales es que los cristalógrafos han estado demasiado ocupados trabajando en una disciplina de fecundidad excepcional, y no han tenido tiempo para escribir y relatar lo que ocurría en su campo de trabajo, ni tampoco se han preocupado por hacer entender el proceso intelectual que ha llevado nuestra ciencia a su estado actual. En este libro, pretendo llevar al público en general y al especializado un relato de la sucesión de ideas que constituye la ciencia de los cristales, y de la labor de los personajes que dedicaron sus esfuerzos anhelos y desvelos a entender el orden de lo cristalizado. En esta obra el lector podrá ver las largas horas de vigilia del investigador, los momentos gloriosos de su triunfo, las tragedias de sus fracasos y la no comprensión de sus coetáneos. En pocas palabras, podrá ver en estas páginas, la gran aventura del cristal.

El proceso que representa entender el cristal, no es más que un detalle dentro de esa gran aventura que es el desarrollo de la ciencia. Este desarrollo no es, en esencia, nada más que un proceso intelectual que ha permitido, y sigue permitiendo, el descubrimiento de lo desconocido. Pero, ¿cómo se puede descubrir lo que no se conoce, si no se sabe ni siquiera que existe? Quizás sea por este motivo que el desarrollo de cualquier ciencia es todo menos racional: depende de la situación del científico y de sus circunstancias; en lenguaje actual, de sus coyunturas. Por esta razón no podemos comprender esa aventura del cristal si no tenemos en cuenta la vida y las ideas de los protagonistas de nuestra ciencia.

Quizás es en el desarrollo de la ciencia donde mejor se ve el papel que el individuo juega en la historia. Es aquí donde podemos observar con mayor claridad el hecho de que «los individuos influyen en el destino de la sociedad». Veremos en las páginas que siguen la influencia considerable que los individuos juegan en el desarrollo de los conceptos y de los experimentos, que, por ser definitivos, han pasado a constituir la base de nuestros conocimientos. Pero en ningún momento podemos olvidar que la posibilidad de ejercer esta influencia, vino determinada por la forma de la sociedad en un momento histórico, de las ideas que prevalecieron, y de las fuerzas que la moldeaban. El individuo ejerce su influencia en función de su talento, es cierto, pero sólo aquel que ejerce este talento en una sociedad capaz de recibir sus ideas tiene éxito. Por esta razón, la historia de la ciencia está llena de precursores que carecen en general de trascendencia en la economía general de las ideas en un momento dado, y que sólo son recordados a posteriori de manera anecdótica en los libros de Historia de la Ciencia. En resumen, el individuo puede cambiar la naturaleza de una interpretación y, en ciertos aspectos, puede determinar ciertas consecuencias. Pero no podemos olvidar que el desarrollo de la ciencia en general, y de la de los cristales en particular, viene determinado por una serie de fenómenos de tipo superior al individuo mismo. En otras palabras, debemos tener en cuenta en nuestro estudio que el científico no piensa, en general, sino dentro de un esquema que se conoce como la ciencia aceptada en un momento dado.

Para que un científico, por ejemplo Haüy, ejerza una influencia definitiva, necesita que sus ideas coincidan con las necesidades que la teoría o la práctica científica requieren en un momento dado. Veremos una y otra vez en nuestro relato cómo los grandes talentos aparecen en lugares muy apartados, pero siempre donde las condiciones sociales son favorables a que se produzca dicho desarrollo.

La historia que sigue nos demuestra el enorme poder del individuo como generador de ideas y de síntesis universales. Pero también que un gran científico lo es sólo cuando es capaz de reunir las necesidades que en un momento dado tiene una ciencia concreta, y la sociedad en general. El científico genial no es un héroe que

Introducción

puede cambiar el curso natural de los hechos, sino que es el exponente consciente de hacia dónde va la ciencia en un determinado momento.

A lo largo de este libro, veremos que el individuo hace historia y en cada caso particular la motivación del individuo, el desarrollo de sus ideas, y las condiciones objetivas que le permitieron su elaboración, son extraordinariamente variadas. Pero esta variación en el detalle, queda como accidental dentro de la armonía que representa la marcha progresiva de la ciencia en conjunto.

1. EL PERIODO PRECRISTALINO

CUANDO EL CRISTAL NO EXISTÍA

Sólo muy tardíamente en el devenir científico, el investigador se dio cuenta de que los cuerpos cristalizados merecían ser estudiados. En realidad, el origen de la ciencia de los cristales debe asociarse al momento en que Stensen observó en 1669 la constancia de los ángulos entre caras equivalentes en cristales distintos de la misma especie mineral. Parece paradójico, a primera vista, que un hecho tan obvio como que los cristales poseen una forma geométrica que les es propia, pasase desapercibido a los numerosos investigadores, muchos de ellos de primera magnitud, que se dedicaron al estudio de la naturaleza, en la Antigüedad y en la Edad Media. En los tiempos antiguos, que vivieron el desarrollo de una geometría que permitió descubrir los poliedros regulares, podríamos pensar que hubiera habido personas que se interesaran por unos cuerpos, los cristales, que eran ni más ni menos, figuras poliédricas naturales. La realidad, con todo, fue muy otra; en aquellos tiempos el cristal no existía para el pensador. ¿Cómo es posible, por ejemplo, que un Platón, que buscaba la belleza y el orden, no se percatara de la belleza y el orden que implican los cristales?

Para buscar una explicación de lo que históricamente sucedió debemos analizar brevemente las teorías que en el mundo clásico griego existían sobre la naturaleza de las cosas.

LAS IDEAS BÁSICAS

Nuestra historia comienza con un oscuro comerciante de Jonia, Tales de Mileto (624-546 a. C.), que introdujo la geometría abstracta en Grecia y se acreditó como astrónomo y primer filósofo de una escuela que iba a ser extremadamente fecunda. Tales fue el primer pensador que se planteó la cuestión de cómo y de qué estaban constituidas las cosas. Que la respuesta fuera el agua, como Tales propuso, no fue para el desarrollo de nuestra ciencia tan importante como la formulación misma del problema, puesto que una vez planteado, la mente humana se encontró ante la necesidad de resolverlo. Fue precisamente el segundo filósofo jonio, Anaximandro (610-546 a. C.), quien propuso que *todas las cosas estaban formadas por una sustancia básica, fundamental, carente de toda propiedad específica, indestructible y eterna*. De esta concepción derivó el atomismo.

Las primeras ideas de un atomismo, es decir, la concepción de una materia constituida por partículas indestructibles separadas por el vacío se debieron a Anaxágoras (500-428 a. C.). Fue este filósofo quien además introdujo la idea de los *cuatro elementos fundamentales* (tierra, aire, agua, fuego), teoría que iba a constituir la base de toda concepción científica, hasta el siglo XVII, por lo menos.

El atomismo lleva inherente el concepto de *discontinuidad*, concepto que iba a ser fundamental, con el devenir del tiempo, para el desarrollo de la ciencia de los cristales. Otro concepto fundamental lo constituye el de *estructura*, que fue usado para otra finalidad distinta, por Pitágoras (582-497 a. C.). Este gran matemático y filósofo utilizaba guijarros para contar. Representando la unidad por un guijarro, los números enteros quedaban representados por conjuntos de guijarros. Los números, llamados figurativos, resultaban de la agrupación ordenada de tales guijarros, según leyes específicas. Así, se obtiene la unidad, como un punto, el tres, como un triángulo, el cuatro, como un cuadrado y así sucesivamente. Que se

asociaran ideas místicas a los números no nos interesa aquí; lo que sí nos interesa es indicar que precisamente de la agrupación de unidades sin propiedades específicas se obtuvieran números (*conjuntos*) con propiedades específicas, y con una geometría (*estructura*) especial.

A pesar de que las ideas pitagóricas contenían el germen de una concepción estructural y numérica de la materia, fue Platón (427-374 a. C.), el filósofo de la idea pura y de la belleza, quien geometrizó la materia. Platón, como Pitágoras, tenía la idea de que las matemáticas, y en especial la geometría, constituían la base de todo fenómeno físico. No en balde se atribuye a Platón el inscribir en el dintel de la puerta de la Academia *Que no entre ninguno que no sepa Geometría*. Esta geometrización de la materia la encontramos descrita en su obra *Timeo*:

Es evidente para todos -decía Platón- que el fuego, la tierra, el agua y el aire son cuerpos. Ahora bien, el género corpóreo tiene siempre profundidad, y la profundidad viene de la necesidad de tener una superficie, y toda superficie de formación rectilínea está formada por triángulos. Lo que debo intentar ahora es haceros ver la estructura y el origen de cada uno de estos elementos (*Timeo*, 52c-53c).

Combinando triángulos, Platón logró descubrir los cinco poliedros, que se conocen como sólidos platónicos, «los más bellos que se pueden concebir». Estos sólidos eran el tetraedro, formado por cuatro triángulos equiláteros; el octaedro formado por ocho; el icosaedro, formado por veinte, y el cubo.

Demos a la tierra -decía Platón- la forma cúbica pues de cuatro especies, la tierra es la más difícil de mover y la más tenaz, y dichas cualidades son las que debe poseer especialmente el cuerpo que tiene las bases más estables... Habiendo dado a la tierra esta forma, debemos atribuir al agua la menos móvil de las figuras que quedan, la intermedia al aire y la más aguda al fuego. Puesto que de todas estas figuras, la que tiene menos base debe ser la que tiene la naturaleza más móvil... El sólido que ha tomado la forma de la pirámide (tetraedro) es el elemento y el régimen del fuego; el que hemos construido en segundo lugar (el octaedro) es el elemento del aire; y el tercero (el icosaedro) el agua (*Timeo*, 54c-55d).

Para Platón, por tanto, la materia estaba formada por elementos materiales cada uno con su forma geométrica particular.

Debemos representarnos estos elementos -continuaba Platón- como tan pequeños que no pueden verse, y que sólo los percibimos, al agruparse en gran número para formar masas. (*Timeo*, 56d).

Para Platón, la tierra sólo podía descomponerse pero no transformarse en los otros elementos, mientras que los demás elementos podían transformarse entre sí. Por ejemplo, el agua se podía dividir en un corpúsculo de fuego y dos de aire, y éste en dos de fuego.

A pesar de que las ideas de Platón sobre «estructura» y la forma de los elementos y de las sustancias compuestas contenían en abundancia ideas atomísticas, fue un contemporáneo suyo, Demócrito de Abdera (470-360 a. C.) quien desarrolló el atomismo griego, siguiendo las ideas de Leucipo de Mileto (alrededor del 460 a.C.).

Las ideas de estos dos autores fueron expresadas en forma elaborada y más completa por otro par de personajes clásicos: el filósofo griego Heráclito de Efeso (540-475 a. C.), llamado el «Oscuro», y el poeta latino Lucrecio (95-55 a. C.), que murió joven y loco. Con ellos el atomismo cobró cuerpo de doctrina. Así el universo infinito y eterno se supone compuesto de cuerpos y espacio, este último idéntico al vacío. Los cuerpos, por su parte, estaban formados por átomos, partículas materiales, privadas de propiedades específicas, salvo *el peso, la magnitud y aquello que es inseparable, la figura* (Carta a Herodoto, 54); los átomos eran además individuales e indestructibles. Estos átomos gozaban de una propiedad, la de poseer movimiento. Es decir, según el atomismo el movimiento está en la partícula; en otras palabras, partícula y movimiento están indisolublemente unidos.

El átomo constituía, según Heráclito, el mínimo físico alcanzable en la división de un cuerpo. Eran indivisibles y aunque podían ser de dimensiones distintas, no podían tener cualquier magnitud. En otras palabras, los átomos eran muy pequeños. Eran estos átomos los que constituían, de acuerdo con estos autores, los

cuerpos, al agruparse *ordenadamente en fila apretada* según decía Lucrecio. Aún cuando se suponía que *los átomos varían según un número limitado de formas* (L. 11. 480), la forma más corriente aceptada era la esférica. Debido a que los cuerpos resultan de la agrupación de átomos, y dichos cuerpos se desmenuzan y se recomponen, la naturaleza, para los atomistas, era dinámica, idea formulada por el propio Heráclito en su famosa frase *no se puede bajar dos veces el mismo río*.

Las ideas atomísticas de la materia constituían también la base de la concepción del mundo para los epicúreos. Esta escuela filosófica fue fundada por Epicuro de Samos (341-270 a. C.) más como una manera de vivir que como una filosofía científica. Epicuro llegó al atomismo por un camino indirecto, pues estaba más interesado en combatir las concepciones religiosas de los griegos que por la ciencia. En su filosofía, los átomos tenían formas diversas, cuyo número era grande, pero no infinito. De acuerdo con su etimología, los átomos eran irrompibles, y por tanto, pasivos. Ampliando este concepto, y confundiendo rigidez con pasividad, Epicuro dedujo las formas posibles e imposibles de los átomos: por ejemplo, un átomo anguloso, que sería frágil, no podía existir. Debido a ello, y pensando en la movilidad de los átomos, dedujo que la forma más adecuada era la esférica, a cuyo resultado llegó también al considerar que la esfera era el cuerpo que tiene la superficie mínima para un volumen dado. Esta deducción constituye un hito en la ciencia, pues fue la primera vez que se dedujo la estructura de la materia según un razonamiento físico-matemático exacto.

Desde el punto de vista teórico, el atomismo suministraba las ideas necesarias para una concepción acertada de la estructura de los cuerpos materiales. Con todo, esta idea no prevaleció, y aunque fue redescubierta muchas veces a lo largo de la historia, fue otra concepción opuesta, incapaz de explicar la naturaleza de los cuerpos, la que tuvo aceptación general. Esta concepción fue preconizada por Aristóteles (384-322 a. C.), cuya autoridad iba a ejercer una influencia decisiva durante un par de milenios.

La filosofía científica de Aristóteles fue expresada de manera completa en su obra *Física*, que constituyó el libro de referencia durante muchos siglos. No debemos olvidar que Aristóteles fue un

naturalista, y que esta manera de pensar se tradujo en especial en la obra a la que hacemos referencia. El naturalista necesita en su trabajo comprender la realidad física tal como existe. Esta necesidad se tradujo en Aristóteles en comprender los cuerpos físicos que gozan de caracteres sensibles, tales como color, textura, forma, peso, olor y sabor. Por esta razón todas las descripciones que siguieron a la del gran filósofo de la antigüedad, tenían como base expositiva referencia a estas cualidades perceptibles por los sentidos.

Todos los filósofos griegos estaban convencidos de que el movimiento o cambio era una característica de la naturaleza. Por esta razón, Aristóteles no podía comprender la existencia de una teoría física a menos que explicara de manera clara el significado de movimiento o cambio. Para explicar esto, Aristóteles introdujo los términos de *materia* que tiene en potencia la posibilidad del cambio, y la *forma* que representa el estado de esta materia en cada momento. Basándose en esta particularidad de la materia, Aristóteles negó el atomismo como contrario a la experiencia, negativa que tuvo enorme importancia en el desarrollo de la ciencia.

Aristóteles introdujo conceptos importantes como *la causa eficiente que produce el cambio o da origen a la forma, y las causas finales que llevan al ser a su fin preconcebido*. Estos conceptos, hicieron ver a Aristóteles que la idea del naturalista es diferente intrínsecamente a la del matemático, porque no podían reducirse a números la materia, la forma, la naturaleza como fuente del movimiento y las causas finales y eficientes; las matemáticas eran útiles para tratar cantidades, pero no eran un sustituto de la realidad.

No vamos a extendernos aquí en una discusión de la teoría aristotélica de la naturaleza. Existen tratados completos sobre este asunto, mucho más completos que lo que aquí podemos decir. Para nuestro propósito baste decir que en esencia, la teoría aristotélica de la materia se basaba en dos ideas fundamentales: la materia era continua, y por tanto no existía el vacío (*la naturaleza aborrece el vacío*). Por otra parte, aceptaba los cuatro elementos como los materiales últimos y fundamentales de todo cuerpo. A estos elementos, agua, aire, fuego y tierra se les asociaban respectivamente, las propiedades húmedo, frío, caliente y seco que según sus proporciones, determinaban las propiedades de los

distintos materiales. Por otra parte, el concepto de estructura, el más importante para el desarrollo de la ciencia de los cristales, no aparecía por ninguna parte en su concepción de la materia.

A pesar de que la teoría más aceptada, la aristotélica, no permitía percatarse del orden necesario para explicar el cristal, el hecho de que para el científico el cristal no existiera debe explicarse además en la existencia de una dificultad insoslayable, derivada del problema que representaba la observación de los cristales mismos. Para el naturalista de la época, la observación de la forma externa de los animales y las plantas era inmediata, puesto que la misma experiencia de la vida diaria proporcionaba un conocimiento directo de dicha morfología. Por esa razón, tanto la Zoología como la Botánica nacieron y se desarrollaron antes. Cosa muy distinta sucedía con la observación de la forma externa de los cristales, o incluso con el tener conciencia de la existencia misma del cristal, puesto que estas cuestiones sólo podían presentarse a aquellos que trataban con minerales. Pero incluso en este caso, difícil era que se percatasen de dichas cuestiones, puesto que el mineral se buscaba solamente para beneficiar de él el metal útil, o, para modificarlo de tal manera que pudieran ser engarzadas en las joyas por el orfebre. En realidad, el minero y el colector están interesados sólo en la utilidad práctica del mineral, y no en el mineral *per se*, como habría de decir Agrícola¹:

El filósofo se place en la contemplación de estos compuestos, mientras que el minero se satisface con el provecho y uso que logra del metal que extrae de ellos.

El filósofo, es decir, el intelectual de la ciudad era la única persona con suficiente curiosidad para intentar descubrir la forma geométrica de los cristales. Pero desgraciadamente, a él sólo le llegaban los productos finales de un proceso metalúrgico, o a lo más, podría admirar gemas que ya habían sido previamente talladas y pulidas por el orfebre.

¹ Georgius Agrícola, *De natura Fossilium*, p. 222.

No sólo existía el problema de la observación directa del cristal, sino que otras dificultades, derivadas de la propia concepción científica de los tiempos, hicieron imposible que se percataran del asunto. Es cierto que los filósofos naturales antiguos se interesaron por las menas que se utilizaban como fuente para obtener los metales, o por gemas que poseían una gran belleza. Por otra parte, la forma externa de las menas minerales, tal como se obtenían directamente recogidas o extraídas de las minas, era variada y accidental, sin que nada más que su color, las más veces poco llamativo, pudiera servir para su reconocimiento. Incluso para una ciencia que daba demasiada importancia a algo tan variable y poco determinado como el color, este aspecto de las piedras no podía llamar demasiado el interés del curioso. Para colmo de desgracias, sólo alguna piedra, como la piedra imán, poseía propiedades específicas que pudieran servir para su caracterización.

Si las cualidades sensibles de las menas minerales no podían llamar la atención del filósofo, las gemas, por el contrario, al poseer propiedades tan llamativas como dureza, transparencia, brillo, alta refractividad y color intenso, necesariamente habían de atraer al hombre de ciencia que vio en ellas unos productos excepcionales de la naturaleza. Pero incluso en este caso, estas propiedades se tomaron más como resultado de acciones maravillosas.

Dificultades en la observación, unidas a una concepción teórica equivocada, fueron el motivo de un retraso considerable para que el científico cayera en la cuenta de que los minerales eran cuerpos cristalizados.

AL PRINCIPIO ERAN PIEDRAS

Que la teoría fuera equivocada o que la observación fuera incompleta no impidió, con todo, que se iniciara en la Grecia clásica un interés por los minerales, interés que, con el transcurso del tiempo daría origen a una verdadera ciencia de los cristales. El primer documento escrito que poseemos se debe a Teofrasto (372-287 a. C.) el discípulo de Aristóteles, y fue escrito allá por el año 315 a. C.

Por aquellas fechas, Aristóteles, había muerto, y Teofrasto le había sucedido en la jefatura del Liceo, la escuela Peripatética que su maestro fundara en Atenas. La jefatura de Teofrasto en el Liceo, no fue el producto de las circunstancias, sino más bien el resultado de una larga amistad con Aristóteles, amistad que se remontaba a la época en que el «Estagirita» abandonara Atenas a la muerte de Platón y, después de una corta estancia en Asia Menor, se estableció en Metilene, en la isla de Lesbos, donde había nacido y vivido Teofrasto. Es muy probable que Teofrasto conociera a Aristóteles ya en vida de Platón, pues, según la tradición, el joven Teofrasto había estudiado en Atenas con el padre de la Filosofía. Sea como fuere, la estancia de Aristóteles en Mitilene con Teofrasto constituyó una de las épocas más fructíferas para el maestro y sirvió para sellar la amistad y un aprecio perenne para con el discípulo. Fue precisamente en esta época en la que se despiertan en Aristóteles las inquietudes naturalistas, como se revela en las numerosas excursiones científicas que ambos hicieron. Fruto de aquella amistad fue el acompañar al «Estagirita» cuando éste fue nombrado por Filipo de Macedonia tutor del joven príncipe Alejandro. Posteriormente encontramos a Teofrasto con el gran maestro cuando éste se retiró a su pueblo natal Estagira, y cuando se trasladó finalmente, a Atenas en 335-334 a. C., con la idea de fundar una escuela.

El lugar que ambos eligieron para establecer la nueva escuela fue un pequeño bosque en las afueras de Atenas, bosque que estaba consagrado a Apolo y a las Musas. Debía ser éste un lugar tranquilo y recoleto, por el cual Sócrates había sentido gran predilección. Como Aristóteles no era ateniense y no podía tener propiedades en la ciudad, hubo de alquilar en dicho bosque una serie de edificios que pronto se transformarían en la escuela más importante de Atenas, el Liceo.

El Liceo fue algo más que una escuela, ya que en ella Aristóteles reunió una rica biblioteca y una considerable colección de instrumentos científicos. En realidad, era un centro de trabajo donde la investigación científica se aunaba en un conjunto armonioso con la labor docente. Fue en este centro donde Teofrasto, elegante, enérgico y convincente, se acreditó como maestro y hombre de ciencia. Cuando falleció (en 288-286 a. C.) todos los habitantes de

Atenas asistieron a su funeral como prueba de estima y respeto. Para tener idea del espíritu que reinaba en el Liceo, cabe citar una cláusula del testamento de Teofrasto:

Doy y lego a los amigos asociados que quieran estudiar literatura y filosofía en este sitio en común, el jardín, el paseo y las casas del Liceo, de tal manera que lo conserven como templo en posesión conjunta... en términos de familiaridad y amistad.

Teofrasto fue un escritor prolífero, a la manera de su maestro, ampliando en sus estudios y tratados mucho de lo que Aristóteles había iniciado. En sus trabajos eligió la monografía más que la obra de tipo general, marcando la tendencia hacia la especialización, que ya se hacía notar en su época. De toda su prolífica producción (Diógenes Laercio cita 227 obras de dicho autor) sólo han llegado a nuestros días unas pocas, entre las cuales se encuentra una monografía corta titulada *Peri liton o De las piedras*. En esta obra, Teofrasto describió unas cincuenta clases de piedras (minerales) y tierras (rocas) como se conocían en aquel entonces, descripciones basadas en las cualidades externas, especialmente el color y la cohesión. La diferencia entre mineral y roca la basa en una hipotética *capacidad de actuar y de reaccionar* (I. 7) que poseen los primeros. Es probable que esta suposición contribuyera a la base teórica de la atribución de propiedades mágicas que en tiempos posteriores se añadió a las piedras, aun cuando nada de ello aparece en la obra de Teofrasto, que siempre se mostró muy comedido en sus interpretaciones. Sólo en el caso de la esmeralda dice que es *buena para los ojos* (IV. 24) o atribuye la formación del *lyngurium* a la orina del lince (IV. 28). Por otra parte, y siguiendo una tradición probablemente caldea, Teofrasto creía en la generación de las piedras, de tal manera que ciertas piedras las considera como hembras y otras como machos, distinguiéndolas gracias a ciertas características cualitativas. En este aspecto, describe las variedades del sardónice, el *lyngurium* y la malaquita (V. 30-31).

La teoría que Teofrasto usó era muy simple y se encuentra sucintamente expuesta en el principio de la obra:

De las cosas que se forman en el interior de la tierra, unas son de agua, otras de tierra. De agua son los metales, como la plata, oro y demás; mientras que de tierra son las piedras, incluyendo las clases más raras, y aquellas variedades de tierra que son peculiares en su color, suavidad, solidez o alguna otra cualidad (I: 1)².

La idea de que los metales estaban formados por agua, y que las piedras lo eran por tierra, era consecuencia directa de la teoría científica aceptada en aquellos tiempos. Por ejemplo, Platón en su *Timeo* decía:

De todas las aguas que hemos llamado fusibles, la más densa, formada por las partículas más tenues y más iguales, sólo tiene una variedad, teñida de un color amarillo brillante. Es el bien más precioso, el oro, que se ha solidificado después de haberse filtrado a través de las rocas. (*Timeo*, 59).

La tierra, comprimida por el aire de manera que el agua no pueda ya disolverla, forma una piedra, la más bella siendo la piedra transparente formada por partes iguales y homogéneas, la peor la que tiene las cualidades opuestas. (*Timeo*, 59).

Para Teofrasto, como para Platón, la tierra era el constituyente principal de las piedras, aun cuando los materiales que pueden fundir debían contener según él también agua. Esto está claramente indicado en los siguientes ejemplos:

Hay muchas piedras que se rompen y explotan violentamente en su lucha al resistir el fuego. Esto se debe esperar de las piedras que han perdido la humedad, puesto que todo lo que puede fundirse debe ser húmedo y contener humedad (II, 10).

Estas (adamas, anthrax, pómez y cenizas) no son afectadas por el fuego y son incombustibles precisamente por haber perdido su humedad (III, 19).

Al hacer estas afirmaciones, Teofrasto, en realidad, no hacía otra cosa más que seguir lo que Platón había dicho en el *Timeo* (59 a-b), y

² La cifra romana indica «el capítulo» y la árabe el párrafo del texto original griego, tal como ha sido publicado por D. E. Eichholz, en *Theophrastus de Lapidibus*, Oxford, Clarendon Press, 1965, VI + 141 p.

que Aristóteles incorporó en su *Meteorología* (378 a, 26 ss.). Hay que tener en cuenta que esta agua era algo que «hubiera podido convertirse en agua, pero que ya no podía hacerlo». De manera análoga, la afirmación de que las piedras están formadas por tierra, debe entenderse como formada por el elemento tierra, y no por lo que hoy entendemos por tierra.

Un punto interesante en la obra de Teofrasto es el mecanismo de la formación de las piedras. Según este autor:

En general, debemos suponer que las piedras están formadas por una materia pura y uniforme, esta materia ha sido producida por «conflujo» o por «filtrado», o como ha sido explicado en otra parte algún otro proceso de separación... Es de esta manera que las piedras y tierras adquieren su suavidad, solidez, brillo, transparencia y otras cualidades por el estilo, cualidades que se presentan en grados variables según la pureza y uniformidad de la materia que forma cada una de estas piedras o tierras (I, 2).

En el filtrado se suponía que el fluido o «humor» que llevaba en suspensión la materia que había de formar la piedra se filtraba a través de la roca circundante, mientras que en el conflujo era el agua la que llevaba los materiales terrosos desde la superficie, a través de canales, hasta una cavidad subterránea, provocando allí su estratificación por deposición del material suspendido en el fluido. En una época en que el conocimiento era solamente cualitativo cabía esperar dificultades en la interpretación de los hechos, y Teofrasto, al menos, fue suficientemente honrado al expresar opiniones contradictorias como la siguiente:

La solidificación se debe en ciertos casos al fuego y otros al frío (I, 3).

Teofrasto no hacía más que seguir la opinión que su maestro había expuesto en su *Meteorología*, según la cual el calor hacía que la tierra produjera dos tipos de exhalaciones, una húmeda, cuyo constituyente principal era el vapor; y otra, seca. La exhalación húmeda daba origen a los metales, mientras que la seca producía las piedras. La exhalación era comprimida por la sequedad de las rocas que atravesaba y congelada por el frío.

La idea que la exhalación húmeda no se pudiera transformar en agua, pero sí en metales no era nueva, pues ya Aristóteles suponía que «la exhalación se había congelado antes de que el agua pudiera formarse». Teofrasto no hizo nada más que seguir esta línea teórica, cuando afirmaba que:

Ciertas piedras muestran claramente la evidencia de haber sido quemadas, pero en realidad todas son el producto de la exhalación seca (50).

La existencia de estas dos exhalaciones, y la congelación, probablemente por frío, constituyeron las premisas de una concepción teórica que perduró hasta tiempos modernos. Es por esta razón, y no otra, que nos hemos referido a lo que Teofrasto hubo de decir en cuanto al origen de los minerales. En realidad, lo que nos interesa señalar es que en ningún momento Teofrasto considerara la morfología del cristal como carácter de interés, y sólo encontramos una referencia de pasada, cuando dice que:

La piedra de las proximidades de Mileto es angulosa y contiene hexágonos (III, 19);

y es todavía mucho más curioso que la cita se refiera al anthrax, una especie de granate, y no al cuarzo, que se presenta siempre bien cristalizado y cuyo nombre griego *kristallos* había de dar origen a la palabra cristal de donde nuestra ciencia tomaría su nombre. El mismo hecho que la palabra *kristallos* significara en griego tanto cuarzo como hielo, indica cuán profundamente convencidos estaban aquellas gentes de que el cuarzo se debía a una congelación de agua tan intensa que ya no era posible fundirla. Esta idea perduró hasta bien entrado el siglo XVII.

Si bien el interés por lo cristalizado no parece haber atraído a Teofrasto, a pesar de todo, y en honor a la verdad, hemos de indicar que, al menos, en la primera obra de mineralogía se incluyó una referencia a la existencia de las caras de un cristal.

DIOSCORIDES

La ciencia de los minerales, y mucho menos todavía, la ciencia de los cristales, no parecían atraer demasiados estudiosos. Ello explica que desde la aparición de la obra de Teofrasto hasta que otra similar se produjera hubieran de pasar varios siglos. Esta vez no fue un naturalista del tipo de Teofrasto, sino un farmacéutico y médico militar, Pedanio Dioscorides, natural de Anazarba (Cilicia) que vivió por los años 60. A pesar de que su obra *Materia Médica*, era un tratado de botánica aplicada a la medicina, su autor tuvo a bien incluir en ella una sección final dedicada a los minerales y sustancias químicas utilizadas por la farmacia de su tiempo. Es precisamente en esta parte secundaria de la obra donde encontramos una continuación para nuestra historia.

Las descripciones de los minerales que Dioscórides nos ofrece tienen poco interés para nuestro relato. Con todo es en esta *Materia Médica* donde encontramos la primera referencia a la obtención de cristales a partir de soluciones, proceso que, en el devenir de los tiempos, se iba a conocer como cristalización. En su descripción del sulfato de cobre (calcantita), Dioscorides explica con cierto detalle el proceso, que recogemos a continuación:

Por disolución, lo diluyen en agua; entonces lo trasvasan a calderos, y lo dejan reposar: la solución se espesa en unos días, dividiéndose en muchas formas, como dados unidos entre sí como un racimo de uvas³.

La referencia a la forma de dados claramente indica la observación de formas cristalinas definidas, que a Dioscorides le debieron parecer cubos, aunque no lo fueran. Pero ésta no es la única referencia a lo cristalizado, pues Dioscorides cita también costras en forma de escamas de pescado del *oropimente* ⁴, o triquitos de alumbre, que tienen forma de cabellos ⁵. Quizás la contribución más

³ Robert T. Gunther, *The Greek herbal of Dioscorides*, Hafner Publishing Co. New York, 1959, IX + 701 pp., especialmente p. 639.

⁴ *Ibid.*, 642

⁵ *Ibid.*, p. 643.

importante de este autor la encontramos en su observación de la exfoliación de la sal. En este caso, dice textualmente:

Pero la sal más eficaz es la mineral, y de ella la que es pétrea, blanca, transparente y espesa, y compacta igualmente; pero la mejor es la que se llama Ammoniaca en razón de su origen, que se deja romper fácilmente y tiene partición plana ⁶.

En esta cita, la referencia a «igualmente compacta» debe referirse a la forma de cubos, mientras que Ammoniaca se refiere al templo de Ammon, en Egipto. Es curioso que si bien Dioscorides se refiere a la exfoliación de la sal común cristalizada, no prestó atención al hecho mucho más claro de la exfoliación del yeso, mineral que describe sin citar esta propiedad.

La importancia de Dioscorides estriba en el hecho de que reconoció la existencia de formas poliédricas, que describió la obtención artificial de cristales, y que tuvo conocimiento de una propiedad muy importante de los cristales, la exfoliación, es decir, la propiedad de romperse según superficies planas.

PLINIO EL VIEJO

Casi al mismo tiempo que Dioscorides escribía *Materia Médica*, un romano, que sería conocido después como Plinio el Viejo, estaba escribiendo una monumental obra en 37 libros, sobre *Historia Natural* que dedicó al emperador Tito.

Gaius Plinius Cecilius Secundus (23-79) fue el gran recopilador de la ciencia romana. Plinio el Viejo fue una persona de extraordinaria actividad, que dictaba sus obras incluso durante sus numerosos viajes, y que sólo se quejaba ante la posibilidad de perder el tiempo; dicho autor tomó sobre sí la ardua tarea de reunir en una sola obra todo el saber científico de su época. Su *Historia Natural* puede, por tanto, considerarse como la traducción al campo intelectual del concepto universal que tenían los romanos de la época. De la ingente obra de Plinio con sus noticias y datos de la más

⁶ *Ibid.*, p. 644.

variada naturaleza, sólo nos interesan para nuestra historia los tres últimos libros de su obra, y específicamente los que tratan de las piedras y gemas ⁷. En ellos se encuentran nuevos datos que sirven para indicar hasta dónde llegaba el interés por lo cristalizado en su tiempo. Como podía esperarse, Plinio basó sus descripciones en las cualidades de los minerales, y como buen colector de noticias incorporó en ellas propiedades anormales, muchas veces imaginarias. Por ejemplo, en el caso del diamante nos dice:

Estas piedras se pueden ensayar en el yunque, y son tan resistentes a los golpes que un martillo de hierro se puede romper en dos e incluso el yunque quedar mellado ⁸.

Esta confusión entre dureza y cohesión iba a perdurar, como muchos otros errores de dicho autor, a lo largo de toda la Edad Media e incluso hasta tiempos muy recientes, como se revela por la persistencia de esta creencia entre prospectores de poca o dudosa cultura. Otra noticia curiosa la tenemos en el ejemplo del color verde de la esmeralda, del cual Plinio nos dice:

En verdad, no existe ningún color más agradable... Además, ella sola entre las gemas, cuando se la mira con atención, descansa la vista en seguida. Pues, incluso después de haber forzado nuestra vista mirando intensamente un objeto, podemos recuperar el estado normal mirando una esmeralda,

razón que utilizó para explicar el dato histórico de que Nerón utilizara una esmeralda tallada para mirar en el circo. No hace falta continuar con otros ejemplos; en realidad lo citado sirve para indicar cierto tipo de información que Plinio reunió en su obra. Con todo, no podemos pasar por alto que Plinio se refirió muchas veces a la morfología de los cristales, aun cuando él mismo confesara que no la entendía. Así, con relación al cuarzo decía:

⁷ D. E. Eichholz, *Pliny Natural History*, vol. X (Libri VVVVI-XXXVII). The Loeb Classical Library. Cambridge. Mass. Harvard University Press, 1962, 344 pp.

⁸ *Ibid.*, XXXVII, 57 (pp. 207-208).

El porqué está formado por caras hexagonales no se puede explicar de forma sencilla, y cualquier explicación se complica por el hecho de que, por una parte, sus puntas terminales no son simétricas, y por otra, sus caras son tan perfectas que no existe ningún artesano que pueda lograr tal efecto ⁹.

Plinio reconoció la regularidad del diamante, del que decía:

... tiene cierta afinidad con el cuarzo, al que se parece por su transparencia y por sus caras lisas que convergen en seis vértices ¹⁰,

clara indicación de su forma octaédrica.

A pesar de todo, nuestro autor tenía dudas de que las formas cristalinas fueran naturales como se atestigua en el caso del berilo:

Los berilos se producen en la India y raras veces se encuentran en otras partes. Todos ellos hábiles artesanos, los tallan en forma de hexágonos... Estos artesanos prefieren obtener largos prismas... Hay quien opina, no obstante, que desde su origen tienen forma prismática ¹¹.

Está claro, por tanto, que la cuestión de la morfología externa de los cristales no sólo era un misterio para Plinio, sino incluso dudaba de que fuera natural. No puede extrañar, por consiguiente, que no encontremos en sus volúmenes más explicaciones sobre el tema, a no ser la noticia de que el alumbre forma triquitos ¹², es decir, cristales aciculares en forma de cabello.

No podían faltar entre las noticias, la referencia a la exfoliación. En este caso, la noticia relativa al yeso es clara:

La forma especular tiene un carácter muy claro al dejarse cortar en hojas tan finas como se quiera ¹³,

o incluso en la descripción del oropimente,

⁹ *Ibid.*, XXXVII, 62-64 (p. 213).

¹⁰ *Ibid.*, XXXVII, 26 (p. 183).

¹¹ *Ibid.*, XXXVII, 76, 78-79 (pp. 225 y 227).

¹² *Ibid.*, XXXV, 186 (p. 395) (vol. IX, de la obra citada).

¹³ *Ibid.*, XXXVI, 160 (pp. 127) (vol. X).

es frágil a la manera de la piedra especular ¹⁴,

referencia clara a la exfoliación hojosa de este mineral.

Las citas que hemos recogido de Dioscorides y Plinio nos indican que a finales del siglo I la angularidad y la exfoliación de ciertos minerales eran ya conocidos, así como la posibilidad de obtener cristales a partir de soluciones acuosas. Parecía como si la ciencia de los cristales fuera a iniciarse a partir de esta época, pues existía una conciencia de unos hechos y por tanto hubiera podido preverse que, siguiendo en este camino, nuevas observaciones permitirían la acumulación de datos que hicieran posible el nacimiento y la formulación de la nueva ciencia. Pero no fue así, debido a una serie de circunstancias históricas que afectaron a toda la ciencia. No vamos a examinar aquí todas esas circunstancias, pues su consideración nos llevaría lejos de nuestro empeño. A pesar de todo, vale la pena referirse a dos hechos: la autoridad que se le atribuyó a Plinio, y la marcha errónea de una teoría científica más interesada en la interpretación que en la propia experimentación y observación de fenómenos.

A pesar de sus limitaciones, la magnitud de la labor de Plinio sirvió para acreditarle como una de las autoridades de su tiempo. No puede extrañar, por tanto, que la información reunida en su *Historia Natural* fuera, en tiempos posteriores, no sólo utilizada de nuevo, sino que fuera reestructurada y reproducida por numerosos autores que le siguieron en el tiempo, autores que en general no añadieron nada o muy poco. Este fue el caso de Caius Julius Solinus, que en el siglo III escribió sus *Maravillas del Mundo*, y de San Isidoro de Sevilla, que compuso las *Etimologías* en el siglo VII. Como ejemplo, nos referimos solamente al libro XVI de las *Etimologías* ¹⁵, libro dedicado a las piedras y metales. En dicho libro, las únicas noticias referentes a la morfología y a la exfoliación se reducen a decir que el cuarzo es sexangular, que la esmeralda se talla en forma sexangular, y que el yeso especular puede cortarse en finas tablas. Sirva esta

¹⁴ *Ibid.*, XXXIII, 79 (p. 61) (vol. IX).

¹⁵ W. M. Lindsay, *Isidori Hispalensis Episcopi. Etymologiarum sive originum*. Oxoni, 1962. Especialmente pp. XVI, XIII, 6; VII, 5; y XVI, IV, 37.

corta cita como muestra del avance nulo que la ciencia había logrado a lo largo de tantos siglos.

LOS LAPIDARIOS

Como hemos dicho, los siglos que siguieron a Plinio marcaron un profundo descenso en el interés de las gentes por lo científico. Ello fue debido, en parte, a que el interés de los intelectuales se dirigió y fue absorbido por otras ideas que tenían mayor importancia para las apetencias de la mente. Un ejemplo de la influencia de estas ideas lo tenemos en los llamados Lapidarios cristianos, o mejor, El Sermón de las doce piedras preciosas que Epifanio ¹⁶ obispo de Salamis en Chipre, escribió en el siglo IV. El motivo del Sermón eran las piedras preciosas mencionadas en la Biblia, con especial referencia a las que figuraban en el pectoral del Sumo Sacerdote, y las gemas que figuran en la base del templo de la Nueva Jerusalén. A parte de unas descripciones sencillas, sin la menor referencia a la morfología, el sentido de la obra es alegórico. A pesar de todo, el Sermón indica la tendencia a englobar el conocimiento científico del momento como servidor de la fe y de la religión, muy de acuerdo con el espíritu de las homilías hexagéticas de San Basilio que formaron su Hexamerón¹⁷.

La fe y la religión no constituían, con todo, el único interés de las gentes; a pesar de que el cristianismo había luchado, y seguía luchando, en contra de las creencias antiguas, y en especial contra la superstición. No obstante, la religión no pudo eliminar las creencias mágicas y la expansión de una astrología, que se extendió de forma abusiva. Esta situación derivó de la asimilación, o mejor del contacto, de la ciencia griega con Oriente durante la época del Helenismo y especialmente en los tiempos finales del Imperio Romano. Como consecuencia de esta extensión temporal y de los contactos con otras

¹⁶ Robert P. Blake y Henri de Vis, *Epiphanius de Geminis*, vol. II of Studies and Documents. Editado por Kirsopp Lake y Silva Lake. Londres, Christophers, 1934, CVVIII + 335 pp.

¹⁷ Sister Agnes Clare Way, *Saint Basil, Exegetic homilies*, vol. 46 de Fathers of the Church. The Catholic University of America Press. Washington, 1963, 378 páginas, especialmente 3-150.

culturas, se produjo de manera inevitable la asimilación de muchas creencias no helénicas. De esta manera se asociaron a las piedras innumerables creencias mágicas, creencias que fueron aceptadas en los *Lapidarios* que aparecieron a lo largo de la Edad Media. No sólo se aceptaron poderes mágicos, sino que estos poderes se quisieron asociar a la influencia de las estrellas, sirviendo de esta manera a modo de puente en el deseo de la época de abrazar todo el conocimiento en una fuente común, la astrología

Un bonito ejemplo de esta extraña manera de interpretar los hechos de observación lo constituye el célebre *Lapidario* que Alfonso el Sabio de Castilla hizo traducir del árabe en 1250. En dicho *Lapidario*, las «piedras» o minerales se describían clasificadas según los signos del Zodíaco y de acuerdo con las estrellas que se creía las formaban, dando base a la creencia de que dichas estrellas no sólo eran la causa de la producción de la piedra, sino que le transmitían, al propio tiempo, propiedades mágicas específicas. La teoría en que esta creencia estaba basada fue narrada en forma elegante y sencilla en la segunda introducción del *Lapidario* ¹⁸ y la reproduzco aquí como muestra del tipo de conocimiento científico que prevalecía en aquel tiempo:

Pues según dijo Ptolomeo y los demás sabios de la Astronomía, toda la fuerza y la virtud que envían los cielos y las estrellas sobre las cosas que existen, lo hacen para que puedan hacer, unas recibiendo lo que llaman materia, las otras modificando lo que llaman forma. Los cuerpos son de por sí bajos y mezclándose entre sí se hacen todos una cosa pesada y fuerte; y por esto son de material vil y desean siempre recibir fuerza de la virtud de los cuerpos celestes altos y nobles. Y es necesario que la tengan en sí, pues no podrían ni hacerse ni mantenerse sin dicha virtud, aun cuando la reciben mejor cuando están preparadas y se hallan en estado de recibirla cumplidamente. Esto se parece al hombre que cuando es niño el alma se encuentra completamente desarrollada, como cosa que no tiene en sí forma y se extiende por todas las formas de los cuerpos en que entra, pero debido a que los miembros del niño no son tan cumplidos como deben ni tienen

¹⁸ J. L. Amorós, *El «Lapidario» de Alfonso X el Sabio*, Bol. R. Soc. Esp. Hist. Nat. (G) 59 (1961), 131-155, especialmente p. 141.

FIG. 1.- *Página del Lapidario de Alfonso el Sabio.*

aparejada la materia temporal de manera completa para recibir la forma celestial, por esta razón no puede obrar tanto como cuando se tiene toda su fuerza desarrollada: pues entonces halla la materia en la forma que lo requiere: la una en recibir y la otra en dar. Y por esto el niño no tiene tanta fuerza cuando es pequeño como cuando es mozo, ni el mozo cuando es mancebo y así hasta que se hace hombre completo. Lo mismo acontece con las demás cosas, no sólo en los animales, sino en las plantas que se conocen como árboles y hierbas, y en las piedras y en todos los demás metales, pues no tienen tan gran virtud cuando nacen como cuando son maduras, porque la materia de las mismas no está preparada para recibir toda la forma completamente. Y por tanto, la mayor virtud la tienen en aquel estado que deben tener y no cuando comienzan a subir o cuando ya van descendiendo.

Esta introducción constituye toda una teoría científica cuyo conocimiento era necesario para quien quisiera utilizar al máximo los beneficios de las esferas celestes:

Y por tanto, toda persona que quiera beneficiarse de estos nobles y antiguos conocimientos debe reparar en estas razones, pues por ellas comprenderá cómo se originan las cosas y cómo se componen y traban unas con otras, y aparecen sus obras y, por lo tanto, podrán mejor beneficiarse de aquellos que hayan de menester.

Pero necesita también el que quiera sacar provecho de esta obra que tenga en cuenta al planeta Júpiter que está en buen estado en las obras de bien y en las del mal al contrario, pues esta regla es general en relación con todos los planetas y estrellas fijas, y por tanto, de las piedras que concuerdan con ellas. Asimismo de las hierbas y de los animales, pues todos tienen la virtud y fuerza que reciben de Dios por mano de los ángeles y por virtud de los cielos y de las estrellas que hay en ellos, y por último, de los cuatro elementos, y así sucesivamente hasta que la cosa nace, se cría y mantiene.

En esta referencia específica a Júpiter trasciende la alta impregnación astrológica de la ciencia natural del siglo XIII. Júpiter era el planeta de la justicia y de la autoridad. Simboliza por tanto el orden, la dignidad y el equilibrio moral y constituye el planeta de la suerte y de los éxitos. Los tránsitos favorables de Júpiter y las conjunciones de este planeta con el Sol, la Luna o Venus dan origen a acontecimientos agradables que garantizan el éxito en la empresa que se ha proyectado. Por esta razón su influencia es decisiva en la

adquisición de las propiedades que las estrellas o los otros planetas van a conferir a la piedra que nace. La variedad de las virtudes recibidas es casi infinita y muchas veces contradictoria, como se demuestra en lo que sigue, del mismo *Lapidario*:

Por lo tanto, una vez que hemos mostrado por este libro, compuesto por Abolays, lo que los sabios antiguos descubrieron por razones verdaderas la virtud que reciben las piedras de los treinta grados de los doce signos según la virtud del grado que ejerce acción sobre ella, conviene que digamos ahora la virtud que tienen las piedras cuando el sol pasa por delante de los signos y de las estrellas que hay en ellos y además en qué momento tiene la virtud más manifiesta, en cuál se muda de acuerdo con los cambios y variaciones de las figuras de las estrellas, las cuales no tienen número ni nadie las podría nombrar sino Dios, que las hizo según dijo el rey Daniel por boca del Espíritu Santo cuando dijo alabando a Dios: Que cuenta la muchedumbre de las estrellas y a cada una la llama por su nombre.

Como científicos que somos, y en unas condiciones totalmente diferentes, tenemos la tendencia no sólo a sonreír socarronamente, ante tales ideas, sino a rechazarlas como pueriles, sin darles mayor consideración. No obstante, el hecho de que personajes tan inteligentes y capaces como Alfonso el Sabio, San Alberto Magno o Santo Tomás de Aquino creyeran en tales ideas, nos indica que, al menos, la teoría era lógica para ellos. Para nosotros, observadores de otro tiempo, lo más importante es reconocer que dichas creencias eran profundas y mantenidas de buena fe, si queremos comprender el tremendo esfuerzo que los científicos que siguieron hubieron de realizar para lograr un cambio completo en la estructura del conocimiento científico. Para darnos una idea de la profundidad del cambio baste indicar unos cuantos ejemplos extraídos del *Lapidario*:

Esta piedra (magnética) tiene la virtud de dar valor al hombre de corazón débil que la lleve, y si es aguerrido lo hará más aún.

(La esmeralda, o piedra del ermitaño), evita el deseo de mujer, y por esta razón el sabio la da a los monjes y ermitaños y a aquellos que han hecho voto de castidad.

Y su virtud (de la esmeralda) es tal que daña el cerebro y los sentidos del que la lleva, de tal manera que cuando la posee no comprende nada.

Y el que tiene cuarzo será amado por las mujeres, y será un hombre de integridad y amará haciendo bien a los pobres.

Y (la turquesa) hará que pierda sus negocios, de tal manera, que será pobre y desgraciado.

Ideas mágicas semejantes se pueden encontrar en otros *Lapidarios* de la misma época. En especial nos interesa aquí el que fue compendiado por San Alberto Magno y que se titula *De mineralibus et rebus metallici* ¹⁹. Ambos *Lapidarios* sirven adecuadamente a nuestro propósito de dar una idea de qué cosas le interesaban y cómo describía el sabio de la Edad Media los minerales y las piedras.

Los caracteres más importantes que San Alberto utilizó en las descripciones, eran como buen aristotélico, el color, la transparencia y la dureza, aunque de manera excepcional hace referencia a la forma externa, y esto sólo en aquellos casos en que resultan tan evidentes que hasta quizá parece superfluo. Por ejemplo, en el caso de la pirita se dice que «tiene forma cuadrada como los dados», o en el caso del diamante «son siempre cuadrados y agudos», es decir, de forma apuntada o piramidal. En otros casos es la propiedad de la exfoliación la que se reconoce; tal es el caso del yeso del cual San Alberto nos dice:

Puede dividirse en capas finas, que se usan en las ventanas como vidrio.

Con todo, esos caracteres externos no poseían un significado especial y sólo se indican de pasada, sin que atrajera en realidad la atención del pensador.

El *Lapidario* de San Alberto Magno merece especial consideración, puesto que representa el último intento serio de desarrollar un tratado de los minerales basado en la filosofía de Aristóteles. San Alberto Magno analiza en él las causas material, eficiente y formal de las piedras, así como las causas de las diferentes propiedades de las mismas. Era como querer realizar el increíble

¹⁹ Dorothy Wyckoff, *Albertus Magnus, Book of Minerals*, Clarendon Press, Oxford, 1967, XIII + 309 pp.

sueño de elaborar una teoría lógica deducida de unas premisas falsas. Veamos cómo veía este ilustre personaje el origen de las piedras:

Cuando el material seco que ha sido activado por la humedad untosa, o el material húmedo que ha sido activado por la sequedad terrestre, se hace eficiente para las piedras, también lo es por el poder de las estrellas y del lugar ²⁰.

En relación con las piedras transparentes o gemas, nos dice:

El agua activada por la sequedad, tanto cálida como fría, es el material básico de estas piedras ²¹.

Elaborando más esta idea, dice:

El cristal de roca y el berilo, que han tomado completamente la forma de agua helada; y Aristóteles dice de ellos que están formados de agua por eliminación completa de calor ²².

Y así sucesivamente. Otros Lapidarios del siglo XIII, tales como *De proprietatibus rerum*, de Bartolomé Anglicus, o *De natura rerum*, de Thomas de Cantimpré, o el *Speculum naturalis*, de Vicent de Bauvais no añaden nada nuevo a lo que acabamos de enumerar. De todo ello se deduce que la teoría de Aristóteles y Teofrasto constituía el conocimiento científico aceptado, y que la ciencia cualitativa y descriptiva de las piedras no tuvo en cuenta la existencia de la morfología cristalina, ni siquiera en forma rudimentaria. Si tenemos en cuenta que estas ideas eran las que prevalecían y se enseñaban en las universidades de los siglos XIII, XIV y XV, podemos hacernos una idea del vacío especulativo que existía en nuestra ciencia.

²⁰ *Op. cit.*, Libro I, cap. 5, p. 22.

²¹ *Op. cit.*, 1, 3, p. 14.

²² *Op. cit.*, 1, 3, p. 16.

EL PROBLEMA DE LLENAR ESPACIO: ORIGEN DE LA RESTRICCIÓN
CRISTALOGRÁFICA

Al exponer someramente la teoría aristotélica de la naturaleza, hemos dicho que el espacio se concebía como un continuo, sin discontinuidades, lo que hacía imposible la existencia de vacío. No es de extrañar, por tanto, que a los científicos de la época les interesase el problema de rellenar el espacio de tal manera que no se produjeran discontinuidades de ninguna especie. El problema es central en cristalografía especialmente desde que las teorías de las redes cristalinas y de la periodicidad han constituido la base de nuestra concepción del cristal. Por esta razón es de interés para nuestro relato citar la obra *Le livre du ciel et du monde* ²³ que Nicolás Oresmes (1323-1382) publicó en 1370.

Oresmes fue uno de los grandes matemáticos, mecánicos y economistas de la Edad Media y uno de los fundadores del lenguaje científico francés. Que lo traigamos aquí deriva de haber tratado, con otros fines ajenos al estudio de los cristales, el problema del relleno de un plano y del espacio. El problema no era nuevo, puesto que ya había sido tratado por Aristóteles y por Euclides. En la versión de Oresmes, contiene dos aspectos claros: Uno de ellos trata de rellenar de manera continua un plano con figuras geométricas idénticas, mientras que el otro trata de rellenar el espacio sin discontinuidad mediante poliedros idénticos y paralelos. La importancia de Oresmes reside en la sencillez y exactitud con que expone el problema.

El relleno del plano lo explica dicho autor de la siguiente manera:

Todas las figuras (planas) cuya suma de ángulos es cuatro rectos pueden unirse en un punto sin dejar espacio vacío ²⁴.

²³ Nicole Oresmes, *Le livre du ciel et du monde*, editado por Albert D. Menut y Alexander Denorny; trad. por Albert D. Menut. The University of Wisconsin Press. Madison, 1968, XIII + 778 pp.

²⁴ *Ibid.*, p. 645.

Es decir, que cualquier tipo de cuadrilátero de lados paralelos, todos ellos idénticos pueden, llenar el plano. Oresmes, también indica que:

Seis triángulos equiláteros... llenan el espacio alrededor de un punto, tres hexágonos pueden agruparse alrededor de un punto sin dejar espacio vacío.

Por el contrario, Oresmes indica que:

Tres ángulos de un pentágono suman menos que cuatro rectos, mientras que cuatro de ellos suman más que cuatro rectos. Por tanto, estas figuras no pueden agruparse en forma alguna alrededor de un punto sin dejar espacio libre, y por tanto, no pueden llenar el espacio ²⁵.

Para el caso de polígonos de más de seis lados, nos dice que:

En el caso de las figuras que siguen, tales como las que tienen siete, ocho o más ángulos, cada ángulo es mayor que el de un hexágono... Por lo tanto, ningún número de figuras con siete ángulos puede llenar el espacio de manera completa, como tampoco ninguna de las demás figuras.

De acuerdo con estas conclusiones, Oresmes considera que las únicas figuras que pueden llenar de manera continua el plano son el triángulo, los paralelogramos cuadriláteros y el hexágono, mientras que las otras no lo hacen. Esta observación constituyó, con el paso del tiempo, la llamada restricción cristalográfica, si en vez de considerar la forma del polígono que rellena el plano, se tiene en cuenta los elementos de simetría que contienen dichos polígonos. Por otra parte, la teoría reticular desarrollada por Bravais en 1850 reconoce que redes planas, formadas por paralelogramos adosados, sólo pueden existir si están formadas por romboides, rectángulos, rombos, cuadrados y hexágonos, de acuerdo con lo que Oresmes había dicho unos quinientos años antes.

Si bien Oresmes resolvió de forma sencilla el problema del relleno del plano, no fue tan feliz en cuanto se refiere al relleno del

²⁵ *Ibid.*, p. 647.

espacio. Oresmes nos dice en su obra que sólo lo pueden hacer el cubo y el dodecaedro romboidal. Que el cubo lo permite es obvio. Lo que es interesante es que no considere que cualquier paralelepípedo lo puede hacer; pero más interesante que un olvido, es el hecho que indicara que el rombododecaedro lo puede hacer, puesto que esto no es obvio. En realidad es la forma que resulta de un empaquetado cúbico de bolas, y éste, como veremos más adelante, costó mucho tiempo darse cuenta que podía existir.

LA PIEDRA IMÁN

Aun cuando las propiedades extraordinarias de la piedra imán se conocían ya en la antigüedad, su utilización práctica como brújula llegó mucho más tarde. La primera referencia que existe en Occidente se debe a un monje de San Albano, en Inglaterra, llamado Alejandro Neckam (1157-1217) quien habló de ella, probablemente en 1186, sin considerarla como cosa nueva. La Edad Media, que en general no se caracteriza por el trabajo experimental, nos suministra uno de esos raros casos, en la persona de Pierre de Maricourt, (alrededor de 1240), natural de Picardía, en Francia, y conocido también por Petrus Peregrinus. El experimento que Pierre de Maricourt llevó a cabo fue el siguiente:

Sobre una piedra imán de forma esférica trazó líneas marcadas por una aguja de hierro situada libremente sobre su superficie. Estas líneas así trazadas convergen en dos puntos, que Petrus Peregrinus denominó polos de la piedra imán. Esta denominación ha perdurado en la ciencia hasta nuestros días. También observó que la atracción o repulsión de dos piedras imán así marcadas dependía sólo de la posición respectiva de los polos, como si éstos fueran el único asiento de la fuerza magnética. De esta explicación han derivado los conceptos de polos y polarización que tanta importancia habían de tener en la ciencia moderna, especialmente a partir de Newton.

Las investigaciones de Petrus Peregrinus fueron comunicadas en una epístola titulada *De magnete*, que escribió en 1269. Esta epístola marca un jalón de la máxima importancia en la historia de la ciencia, pues no sólo es importante como contribución al campo del

magnetismo, sino que señala el principio de un cambio fundamental en el enfoque de la ciencia al indicar la importancia del método experimental. Fue este método, unido a los trabajos de Roberto Grosseteste (1175-1253) y especialmente a las obras de Roger Bacon (1214-1294), el que iba a iniciar un cambio profundo en el desarrollo científico del mundo occidental. Pero este cambio no afectó de manera profunda la marcha del conocimiento en nuestra ciencia hasta el siglo XVI, tal como veremos en el próximo capítulo.

2. EL DESCUBRIMIENTO DE LA FORMA CRISTALINA

LA BELLEZA DEL CRISTAL Y LOS ARTISTAS

¡Cuántas veces y cuán numerosas personas han sido atraídas por la belleza y la armonía de la forma cristalina! No hay duda de que la regularidad geométrica de un mineral cristalizado, unido a su transparencia única, a su dureza y muchas veces su color, transforma su observación en una experiencia estética. Son precisamente estas cualidades estéticas las que impulsan a coleccionar minerales cristalizados, porque un cristal es, ante todo, un objeto de extraordinaria belleza. Si los cristales son bellos, no podía menos que ocurrir que en el Renacimiento, que produjo una explosión de sentimiento artístico, al propio tiempo que reconoció el valor de la observación directa de la naturaleza, fuera el medio en el cual se utilizara por primera vez el cristal como elemento decorativo y que, por tanto, se representara de manera fidedigna. Y no es extraño que esta empresa fuera iniciada por el artista, en vez del hombre de ciencias.

El artista fue Alberto Durero (1471-1528) y la obra el grabado *Melancolía* que produjo dicho artista en 1514. Quizás ninguna otra obra de arte puede tomarse mejor como una introducción a la ciencia de los cristales. Lo interesante es notar que precisamente esta obra fue, en efecto, la introducción a nuestra ciencia. La obra contiene como elemento decorativo principal un enorme cristal romboédrico



FIG. 2.- *Melancolía*, grabado de Durero.

truncado, probablemente de calcita. Y digo que esta obra fue la introducción a nuestra ciencia, pues no sólo representa un cristal, sino uno de calcita, especie cristalina que había de aportar los datos experimentales básicos en los cuales nuestra ciencia había de fundarse. Pero no sólo el hecho de incluir un cristal es significativo en la obra de Durero si no que el resto del grabado está de acuerdo con este sentido introductor a nuestra ciencia. El ángel pensativo, por ejemplo, tiene a su alcance una serie de instrumentos de medida y cálculo, y, por si ello fuera poco, el ángel mismo está siendo en su mano un compás, único instrumento de la época que podía permitir medir ángulos. El ángel está quizás meditando las maravillas que encierra el cristal, maravillas que no podían explicarse todavía. Por esta razón, la bestia de la melancolía aparece en el firmamento, pero al mismo tiempo como huyendo del sol naciente del mismo saber que iba a iniciarse. La esperanza del futuro puede interpretarse por la presencia del arco iris, esperanza que una serie de sucesos históricos inmediatos iba a demostrar ser real.

Pero Durero no sólo no se redujo a suministrarnos una obra de arte que puede utilizarse como introducción a nuestra ciencia, sino que estuvo interesado en los cristales, al menos en su representación. Como arquitecto e ingeniero que era, estaba interesado en la representación de figuras tridimensionales, es decir, estaba interesado en el problema de las proyecciones. Su contribución en este campo escapa a la finalidad de este libro. Baste decir a este respecto que Durero fue el primero que construyó la proyección oblicua de un cubo, proyección que iba a ser de gran utilidad para la representación de los cristales. Su interés por la construcción de cuerpos tridimensionales le llevó a tratar la construcción de poliedros más o menos regulares. A este respecto, Durero ¹ produjo el primer álbum de dibujos para la construcción de estos poliedros. En su colección reunió once de estos dibujos, de los cuales tres correspondían a cuerpos regulares, añadiendo la nota de que el octaedro correspondía a la pirámide del diamante. Este tipo de

¹ Albrecht Dürer, *Underweysung der Messung, mit dem Zirckel und Richtscheit, in Linien, Ebenen und gantzen Corporen*, 1538. Citado por Ludwig Burmester, *Geschichtliche Entwicklung des kristallographischen Zeichnens und dessen Ausführung in schräger Projektion*. *Zeit. für Kristallogr.* 57 (1922), 1-47.

dibujos todavía se utilizan hoy con ventaja en la enseñanza de la cristalografía, y todos los que hemos estudiado cristales hemos podido construir modelos de cristales siguiendo un método que fuera iniciado por Durero en el siglo XVI.

CAMBIO EN EL ENFOQUE CIENTÍFICO

El interés de Durero por el cristal fue, en realidad, la consecuencia de un profundo cambio en el enfoque científico, cambio que está estrechamente unido al fenómeno del Renacimiento. Quizás la persona más representativa, y la más popular, de las muchas que surgieron en esta época fue Leonardo de Vinci (1452-1519). Un arquitecto, ingeniero, mecánico, inventor, naturalista y, sobre todo, artista, Leonardo es un genio universal en una época de genios y revolucionarios. Su manera de vivir, sus obras y, especialmente, sus ideas representan la nueva moda y manera de la época. Desgraciadamente este gran personaje histórico no contribuyó a nuestra ciencia de los cristales. Con todo, vale la pena traerlo aquí porque sus ideas acerca de la ciencia habían de ser descubiertas una y otra vez por los muchos que trabajaron y contribuyeron a desarrollar la ciencia como la entendemos hoy en día. Para Leonardo:

Las ciencias verdaderas son las que han surgido a través de la experiencia de los sentidos y las que silencian la voz de los que sólo discuten, y que se nutren no por las fantasías de los visionarios, sino las que se basan en los primeros y verdaderos principios.

Una investigación no merece el nombre de una ciencia a menos que pase la prueba matemática, (pues) no existe certeza a la que no pueda aplicarse una rama de las ciencias matemáticas.

No existe en la naturaleza efecto sin causa: averigua la causa y no te preocupes por el experimento ².

Leonardo creía que el conocimiento científico deriva de la observación y de la experimentación, comprobada e interpretada de

² Leonardo de Vinci, *Traité de la Peinture*. Trad. por Péladan. Librairie Ch. Delagrave, París, 1910, 246 pp.

acuerdo con los primeros principios deducidos de la experiencia, y que puede ser analizada directamente mediante una serie de pruebas matemáticas y, por consiguiente, cuantitativas. Estas ideas constituyen, en realidad, la base sobre la cual se ha fundado la ciencia moderna, especialmente desde el tiempo de Galileo hasta nuestros días. Leonardo fue, en realidad, un precursor de un movimiento que había de culminar un siglo después. Desgraciadamente su influencia fue disminuida por su extrema preocupación por el secreto, que evitó que Leonardo publicara cosa alguna, aunque fue suficientemente consciente al conservar sus pensamientos e ideas en numerosos pliegos de papel, que cuidadosamente almacenó durante su fructífera existencia.

LOS HOMBRES DE CIENCIA

Aun cuando las ideas de un Leonardo eran modernas, o a pesar de que un Durero se interesase en la representación de cristales, nuestra ciencia sólo empezó a tomar forma gracias a la dedicación y esfuerzo de los hombres de ciencia del siglo XVI y XVII. La ciencia de los cristales empezó a desarrollarse gracias a una nueva manera de ver los fenómenos de la naturaleza, visión que puede resumirse en las palabras de Agricola (1494-1555):

Los teólogos atribuyen a causas divinas los poderes de los minerales, mientras que los científicos lo atribuyen a causas naturales ³

o en la visión revolucionaria que un Palissy (1510-1590) tuviera de su propia ciencia:

Tomaré mi pluma para expresar lo que yo creo, o mejor para relatar lo que he aprendido con tanto trabajo, y no en unos cuantos días, o leyendo

³ Georgius Agricola, *De Natura fossilium*, p. 84.

varios libros, sino analizando las entrañas de la tierra. Para probar las razones que escribo, satisfago la vista, el oído y el tacto ⁴.

El cambio radical en el enfoque científico consistió principalmente en obtener el conocimiento directamente de la experiencia, basada en observaciones sensoriales. Es decir, el nuevo enfoque daba mayor importancia a la observación y a la experimentación que a la fuerza de una autoridad escolástica, y al poder deductivo de una lógica formal. Este cambio implicaba para el científico un volver a la naturaleza misma en busca de información de primera mano, información que pudiera utilizarse en el desarrollo de nuevas teorías, en vez de partir de unas teorías aceptadas e intentar interpretar con ellas los hechos de observación. Para el mineralogista esta vuelta a la naturaleza representó volver allí donde el mineral existía y allí donde el mineral se utilizaba. En otras palabras, requería el retorno al hogar del minero. Fue esta preocupación la que inició una nueva ciencia de los minerales en el siglo XVI, desarrollada no ya por teóricos que se basaban en la autoridad antigua, sino por individuos que estaban estrechamente asociados a los trabajos de minería.

Fue precisamente esta preocupación por la parte práctica lo que movió a dos autores, Vanoccio Biringuccio (1480-1538/9) y George Bauer (1494-1555), mejor conocido por su nombre latinizado de Agrícola, a escribir una serie de obras técnicas sobre la explotación y utilización de los minerales. A ellos se habían de sumar algún tiempo después el español Álvaro Alonso Barba (1569) con su obra el *Arte de los metales* publicado en Sevilla en 1640. Como la obra de Barba es más tardía ⁵, trataremos aquí solamente de los primeros a pesar de su indudable importancia especialmente en España y sus dominios. De la *Pirotechnia* fue la obra póstuma de Biringuccio. Biringuccio era un peripatético que afirmaba:

⁴ Bernard Palissy, «Introducción a su tratado de metales y alquimia», en *Admirable discourses of Bernard Palissy*, University of Illinois Press, Urbana, 1957, VI + 264 p. (p. 78 y p. 26).

⁵ Para más detalles, ver J. L. Amorós, «La mineralogía española en la época del Barroco: Alonso Barba», *Bol. R. Soc. Esp. Hist. Nat.* (G), 61 (1963), 167-186.

Sé que todo cuerpo de este orden inferior debe estar compuesto de cuatro elementos,

y debido a su formación escolástica, todavía creía en cierta rivalidad existente entre los cielos y la naturaleza, tal como revelan sus propias palabras al referirse a las gemas:

Sólo te diré que únicamente creo que la naturaleza ha creado tales cuerpos en la tierra de pura envidia de los cielos, para superarlos. De manera análoga a como el mar ha imitado todo tipo de animales terrestres, así también se han producido estas piedras a semejanza de las estrellas, como podemos comprobar en la gran variedad de sus colores y en los muchos efectos de sus cristales... Por tanto, uno debe buscarlas para poseerlas como cosas preciosas y divinas.

El hecho de que Biringuccio ⁶ se refiera reiteradamente a las propiedades mágicas de las gemas, nos indica que dicho autor utilizó para su información fuentes antiguas. A pesar de todo, en su obra aparece un párrafo importante para nuestra ciencia. Refiriéndose a la pirita (que Biringuccio denomina marcasita) decía:

La mayor parte se encuentra en venas y en la forma de granos grandes o pequeños, todos ellos en forma de cubos o dados, o en «biscuadros» (lo que hoy llamamos dodecaedros pentagonales) tan correctos que no existe artífice que pueda producir sus ángulos más exactamente o mejor con la ayuda de instrumento alguno.

A pesar de que la referencia a la morfología en forma de dados ya se encontraba citada (como hemos indicado en el capítulo anterior) en el *Lapidario* de Alfonso el Sabio, podemos interpretar, con todo, dicha cita como un esfuerzo en llamar la atención, por parte de dicho autor, en la existencia de una morfología constante en un mineral dado.

⁶ Vanoccio Biringuccio, *De la Pirotechnia*. Libri X, Venecia, 1540. Venturino Rossinello. 8.º VIII + 68 pp. Traducido al inglés por C. S. Smith y H. T. Gnudi, Am. Inst. The M.I.T. Press, Cambridge, Mass, 1966, XXVIII + 477 pp.

AGRÍCOLA Y LA MORFOLOGÍA DE LOS MINERALES

Mayor importancia para nuestra ciencia tiene la obra de Agrícola. Georg Bauer, Agrícola, nació en Glauchau, Sajonia, el 24 de marzo de 1494, y fue hombre de gran conocimiento y amplia curiosidad científica. A los veinte años, entró en la Universidad de Leipzig, donde obtuvo su título de *Baccalaureus Artium*. Unos años después, en 1524, se trasladó a Italia para ampliar sus estudios de filosofía, medicina y ciencias naturales, estudiando en universidades tan renombradas como Bolonia, Venecia y, probablemente Padua. En 1527 fue elegido médico de Joachimsthal, Bohemia, región donde florecía una nueva industria minera gracias al descubrimiento de ricos yacimientos minerales. Fue en este ambiente donde Agrícola pudo aprender los conocimientos prácticos de los mineros, al mismo tiempo que ejercía su profesión médica. El perspicaz médico, gracias a su asociación con los mineros más distinguidos de la región, pudo comparar con la realidad lo que había aprendido de los antiguos autores griegos y latinos. Consecuencia de estos contactos, verdadera universidad práctica para él, fue la primera obra de minería de Agrícola: el *Bermannus*⁷ que publicó en 1530. Es un diálogo entre personajes imaginarios; dos de ellos, Nicolás Ancon y Johannes Neavine, eran médicos y habían estudiado en la Universidad, mientras que el tercero, Bermannus, era un minero, mineralogista y autodidacta en matemáticas y poesía. En su obra, Agrícola no hacía más que relatar su propia aventura intelectual, pues el mismo nombre de Bermannus era la latinización de Lorentz Bermann, uno de los expertos mineros que ofrecieron su amistad a Agrícola en Joachimsthal. Su estancia en esta ciudad tuvo enorme influencia en el desarrollo de las ideas de Agrícola; pudo ver por sí mismo los minerales, conocer sus diferencias y estudiar su

⁷ Georgius Agricola, medici, *Bermannus sive de metallica*. Ver *De re metallica*. Trad. por Herber Clark Hoover. Dover Publications Inc. New York, 1950. XXXI + 638 pp. (especialmente pp. 596 a 600).

naturaleza. Todo ello se tradujo en una obra fundamental, *De natura fossilium*⁸, que Agrícola publicara años más tarde, en 1546.

De natura fossilium fue concebido como un libro de texto. Podemos decir que fue el primer libro de texto de mineralogía moderna, a pesar de que Agrícola todavía era peripatético en su formación y manera de pensar. Tal es la importancia de esta obra que Werner, el fundador de la mineralogía moderna, llamaba a Agrícola «el padre de la mineralogía»

Como peripatético que era, Agrícola utilizó como base de sus descripciones cualidades tales como olor, sabor, color y otras por el estilo, cualidades que pueden reconocerse fácilmente por los sentidos. Pero no contento con ello Agrícola, por primera vez, dio la debida importancia a la forma geométrica que muestran los minerales. Las citas que podemos sacar de su obra son numerosas. Por ejemplo, nos dice que:

Ciertos minerales son angulosos. Los hay triangulares como ciertas gemas, cuadrados o cúbicos como el diamante y ciertas piritas encontradas en los ríos y torrentes... El cuarzo tiene seis ángulos y el pagonio (una especie de drusa) muchos ángulos. Otros minerales tienen terminaciones hexagonales, tal como el cuarzo y a veces el diamante.

Pero Agrícola no podía contentarse con una afirmación tan general como la que acabamos de citar. Siempre que tuvo ocasión se refirió a la forma externa del mineral, hecho que marca el momento en que se descubre, en realidad esa morfología tan típica del cristal. Por esta razón, vale la pena citar aquí algunas de las observaciones de este genial hombre de ciencia:

(La calcita) es blanca y está cubierta por todas partes con escamas bien visibles cada una oblicua con el aspecto de un rombo, de donde proviene su nombre de rombites.

La esmeralda hexagonal, el carbundo, el zafiro e incluso el diamante tienen caras naturales.

⁸ Georgius Agrícola, *De natura fossilium* (Textbook of mineralogy). Trad. Inglesa de la primera edición latina de 1546. Marck Chance Bandy y Jean A. Bandy. The Geological Soc. of America. Special paper 63, New York, 1955, XIII + 240 pp.

Cristales (cuarzo) imperfectos se ven a veces con sólo tres caras como si fueran medio cristales, puesto que este mineral es hexagonal, aunque sus lados son en general desiguales.

La terminación en punta del cristal (cuarzo) es hexagonal, así como su cuerpo. La punta difiere en que la pirámide estrecha no es siempre igual a la inferior, y a veces la pirámide ancha cae sobre la parte estrecha.

El diamante se encuentra con frecuencia en forma de cuerpos hexagonales, incoloros, que terminan en punta.

La pirita es cúbica.

Estas citas son suficientes para indicar la importancia que Agrícola dio a la forma geométrica y angular de los minerales. Con estas observaciones podemos decir que se inició nuestra ciencia.

BERNARDO PÉREZ DE VARGAS Y SU «DE RE METALICA»

Para comprender lo que la obra de Agrícola representa, vale la pena traer aquí la obra *De re metalica* que Bernardo Pérez de Vargas publicara en Madrid en 1569, dedicada al «muy poderoso Señor don Carlos, príncipe de España» ⁹.

Pérez de Vargas, siguiendo las ideas filosóficas de la época, creía en la teoría de los cuatro elementos, y en que los metales estaban constituidos por materia y humedad. El tipo de esta humedad era especial, como se prueba por el hecho de que un metal se pueda fundir, hecho que se creía asociado a la presencia de esta humedad. Por el contrario, las piedras contenían más tierra que humedad, como se demuestra al no fundir y calcinarse por la acción del fuego. En cuanto al origen de los metales, Pérez de Vargas lo atribuye al fuego interno de la tierra, es decir, a una exhalación producida por dicho fuego. Como prueba de ello invocaba la observación de los mineros, según los cuales las rocas a las que los metales estaban

⁹ Bernardo Pérez de Vargas, *De re metalica*, en el cual se tratan muchos y diversos secretos del conocimiento de toda suerte de minerales, de cómo se deben buscar, ensayar y beneficiar, con otros secretos e industrias notables, así para los que tratan los oficios de oro, plata, cobre, estaño, plomo, acero, hierro y otros metales, como para muchas personas curiosas. Madrid, Casa de Pierres Cosin, 1569 (89) + 206 pp. dobles.

asociados en la mina, estaban ennegrecidas y quemadas. Pero dejemos a nuestro autor decirlo a su manera:

Y por la disposición de la virtud formativa procede (el fuego) en la materia, y con la virtud de las estrellas y cielo se determina a la forma. En tal caso y coyuntura, siendo llegado el artificio de la mezcla de la materia, se levante un vapor y humos donde van todas las virtudes incorporadas y resolutas de la misma materia, y con la fuerza del calor suben por las concavidades de la tierra, que son de suyo penetrativas, hasta que llegan a los lugares estrechos se detienen suffocándose y revolviendo el vapor en sí mismo se cuaja poco a poco, con la fuerza del frío y suffocación lo más sutil de la mezcla y materia informada¹⁰.

De todo ello se deduce de Vargas que:

no la frialdad, sino el calor es eficiente causa de los metales¹¹.

En cuanto a la acción de los poderes del cielo nos informa así sobre la influencia de los planetas en la generación de los metales:

Y así excediendo la virtud del Sol, a la materia terrestre, y su virtud dixo resultar oro, y excediendo la virtud de Júpiter, resulta estaño. Y excediendo Marte, hierro. Excediendo Saturno, como Venus, cobre. Mercurio, azogue. Luna, plata... La causa porque a los planetas se atribuyen los metales, es de congruencia, porque, así como las piedras preciosas, por ser fijas y estables en su ser se atribuyen al gobierno de las estrellas fijas, así los metales por ser varios inconstantes, se atribuyen a los planetas erráticos, que de su natura son móviles¹².

Todas estas ideas estaban de acuerdo con la alquimia, que Vargas usa constantemente en su obra. No vamos a tratar de ellas aquí, puesto que la selección de esta obra sólo se ha hecho con el fin de indicar qué ideas la nueva ciencia había de eliminar. Nos interesa, con todo, indicar que en relación a la morfología cristalina, Vargas sólo se refirió a la pirita, y al diamante. En el primer caso decía que:

¹⁰ Pérez de Vargas, p. 16.

¹¹ *Ibid.*, p. 8.

¹² *Ibid.*, p. 11.

formada en granos cuadrados a manera de dados entremetidos unos con otros en la peña ¹³;

y al referirse al diamante nos dice que:

la forma y hechura de los diamantes en dos pirámides esquinadas pegadas una con otra, que se llaman puntas de diamantes ¹⁴.

Finalmente, Vargas no dejó de referirse a la exfoliación, aunque sólo fuera de la no muy clara del oropimente:

tiene conchas y escamas, hojas delgadas como un papel unas sobre otras, que fácilmente se apartan y quiebran ¹⁵.

En honor a la verdad, las descripciones de Vargas no eran muy dispares de las que Brininguccio diera. Este autor y Agrícola figuran entre las autoridades que Vargas citó, aunque sólo conoció *De re metalica* de este último autor, lo que se explica por su interés en el beneficio de metales y no en mineralogía general.

PALISSY Y SUS DISCURSOS ADMIRABLES

Agrícola fue sin duda un hombre que triunfó en vida. A pesar de ser católico en territorio protestante, sus conciudadanos le respetaron y estimaron. Si durante su vida no tuvo problemas, éstos surgieron en el momento de su muerte, pues la ciudad de Chemnitz, donde falleciera, le negó su última voluntad de ser enterrado en la Catedral, que por otra parte era protestante. Su cuerpo hubo de permanecer insepulto cuatro días, hasta que se decidió darle final morada en la cercana Catedral de Zeitz, en territorio católico. Problemas de este tipo eran frecuentes en una Europa dividida por las discusiones violentas y, muchas veces, sangrientas, secuela de la

¹³ Vargas, *op. cit.*, p. 42.

¹⁴ Vargas, *op. cit.*, p. 49.

¹⁵ Vargas, *op. cit.*, p. 44.

Reforma. Estos problemas habían de afectar en especial la vida de otro personaje interesante para nuestro relato.

Bernard Palissy (1510-1590) era un protestante en territorio católico (Francia), y su vida fue más turbulenta y desgraciada que la de Agrícola. Un girondino próspero, inventor de un tipo de porcelana, que le produjo cierta fortuna, Palissy era un autodidacta de gran inteligencia y acerada lengua. Quizás fue este punto lo que le valió persecuciones y estancias en prisión, de las que fue salvado varias veces por Catalina de Médicis, de la cual Palissy era su protegido y confidente. Su turbulenta vida terminó en la Bastilla de Bussy, donde ya viejo y físicamente deshecho había sido encarcelado.

Palissy había reunido en sus numerosos viajes por la Francia meridional una abundante colección de mineralizaciones y fósiles, sobre los que llevó a cabo acertadas observaciones científicas. Palissy aparentemente gozaba en la enseñanza de sus propias ideas, y en sus clases utilizaba con orgullo la colección que tan pacientemente había acumulado. Sus opiniones científicas fueron expuestas en los *Discursos admirables*¹⁶ que publicó en 1580.

Si hemos de tener en cuenta el valor que los *Discursos admirables* tienen para nuestra ciencia, ciertamente el calificativo que les puso Palissy fue muy acertado, pues en él se suministran admirables observaciones sobre la morfología cristalina. En esta obra, Palissy se refiere numerosas veces al cuarzo que presenta puntas de rombos, a minerales con formas cuadradas, triangulares y pentagonales, a las caras pentagonales de la pirita, a las formas angulares de los minerales de hierro, estaño y plata. Entre estas descripciones son especialmente de interés las que reunió en la sección denominada *Copia de las etiquetas* de su colección. En ellas encontramos:

Nota este pequeño argumento, bien probado por la misma cosa en sí, y observa con cuidado todas las menas metálicas; tú encontrarás en la superficie del metal un infinito número de puntas, talladas por la naturaleza en facetas, como si lo hubieran sido artificialmente: la mayor parte de estas puntas están formadas por material cristalino (cuarzoso), o mejor dicho, de cristal (cuarzo) lo que me ha hecho comprender y asegurarme que nunca

¹⁶ *The admirable discourses of Bernard Palissy*. Trad. inglesa por Aurelio la Rocque, University of Illinois Press, Urbana, 1957, VI + 264 p.

estas puntas se forman naturalmente fuera del agua: pero ciertamente *todos los materiales congelados* (cristalizados) en agua *tienen una superficie con formas triangulares, cuadrangulares o pentagonales*, que digo se han formado por una maravillosa naturaleza, de manera similar a como las plantas mantienen un cierto orden, así vemos que las rosas y las zarzas forman espinas para su defensa, así los materiales metálicos y pétreos forman muchas escamas, como se ve en los peces de variadas especies.

Esta cita contiene una frase, que se indica subrayada, que constituye el primer principio de nuestra ciencia. En lenguaje moderno, diríamos que *la forma poliédrica es una propiedad natural de los cristales*, o mejor aún:

Los minerales tienen la propiedad de formar cristales.

Palissy descubrió también que una morfología específica era una característica propia de una sustancia dada, tal como puede deducirse de lo siguiente:

Una cierta vez disolví una libra de sal en un caldero lleno de agua, lo dejé enfriar, y cuando fue frío encontré que la sal de piedra al congelarse lo hacía en las paredes del caldero en forma de largos carámbanos de forma cuadrangular.

Estas y otras observaciones similares le confirmaron que todos los cristales se forman de soluciones, o mejor, a partir de lo que él llamaba agua congelativa. Pero veamos lo que Palissy dijo a este respecto:

¿Queréis prueba mejor de que la sal, la sal de piedra, el alumbre, el sulfato de cobre y todo tipo de sales, cuando se han disuelto en agua, pueden separarse de ella y formar cuerpos distintos y separados?

El descubrimiento de la cristalografía a partir de soluciones había de tener una influencia de la mayor importancia no sólo para nuestra ciencia sino para la geología en tiempos futuros. Este descubrimiento debemos atribuirlo a Palissy, aun cuando los alquimistas lo utilizaban ya, porque fue este autor el que entendió

por vez primera el proceso mismo del crecimiento cristalino. En efecto, la utilización de términos como *incremento congelativo* y *adición congelativa* claramente indican que Palissy comprendió la cristalización como producida por la adición de material nuevo a la superficie del cristal.

Con Agrícola primero y Palissy después, nuestra ciencia empezó a adquirir cuerpo. Podemos decir que con ellos la ciencia de los cristales cristalizó.

LA CONSTANCIA DE LA FORMA CRISTALINA SE CONVIERTE EN CONOCIMIENTO ACEPTADO

Las observaciones de Agrícola y Palissy nos indican que por esta época, es decir, a mediados del siglo XVI el interés por lo cristalizado empezaba a cobrar importancia.

Casi al mismo tiempo que Agrícola estaba dando sus últimos toques a su *De re metalica*, el Arzobispo de Upsala, Olaus Magnus publicaba en 1555 en Roma un curioso libro sobre *Fenómenos naturales* ¹⁷. En este libro su autor incluyó veintitrés dibujos que representaban cristales de nieve. Los dibujos sobre los esquemas de Olaus Magnus eran demasiado primitivos e inexactos para dar la morfología hexagonal de los cristales de nieve, pero su inclusión indica cuán interesantes eran tales cristales. El problema fue considerado nuevamente medio siglo más tarde por el célebre astrónomo y matemático alemán Juan Kepler (1571-1630). Kepler ¹⁸ acometió el estudio de los cristales de nieve debido a razones curiosas, que veremos con mayor detalle en el próximo capítulo. Aquí nos interesa indicar solamente que el problema le interesó, y que Kepler no sólo estudió las formas hexagonales de las dendritas de nieve, sino que intentó justificar esta forma a partir de conceptos

¹⁷ Citado por W. A. Bentley y W. J. Humphreys, *Snow crystals*, Dover Publication, Inc. New York, 1962, 227 pp.

¹⁸ Joannis Kepleris, *Strena Seu de nive sexangula*, Godefridum Tampack, Frankfurt on Main, 1611, Trad. alemana por H. Strunz y H. Born. Bernard Bosse Verlag. Regensburg, 1958, 29 pp.

meramente geométricos. No sólo le interesó la morfología de la nieve, sino que se refirió también al común decir de los artífices que el diamante se presenta en octaedros.

Algún tiempo después otro alemán, esta vez un químico y naturalista, Joachim Jungius (1587-1657) se refería en sus obras a las cristalizaciones cúbicas de la sal, el alumbre y el azúcar, a la forma hexagonal del cuarzo y otras sustancias. Como compendio de sus observaciones en su *Zooscopiade physica minores* publicada en 1662, Jungius pudo generalizar el hecho ya aceptado de que

Figure sales specim ejus non variat,

es decir, la forma de la sal no cambia.

En otro orden de ideas y por otras razones, el gran físico y filósofo Pierre Gassendi (1592-1655), de quien hablaremos con mayor extensión en el capítulo próximo, también se refirió a la *metallis* ¹⁹ se refería a la forma hexaédrica de la amatista, a la octaédrica del diamante y a la dodecaédrica de la esmeralda, probablemente refiriéndose a la existencia de un prisma de seis caras, o a un octaedro y a un prisma de doce caras. De la sal gema dice que es *tesellata*, es decir, en forma de cubos y que se rompe en fragmentos cúbicos, exfoliación que también reconoce en el yeso especular que se rompe en fragmentos rómbicos y romboidales cada vez más pequeños. Esta observación tuvo gran importancia para este hombre de ciencia pues decía que:

No veo cómo estas piedras están formadas por una masa continua y no discreta..., (sino) que sus partes y partículas (constitutivas) se distribuyan regularmente, y que los menores (o las partes) se compacten conformando con el mayor (o todo).

Esta frase indica claramente que en la mente de Gassendi el hecho de una exfoliación regular era indicio de una estructura discontinua y poliédrica de los cristales, y que la morfología era una consecuencia directa de una aglomeración regular de estos cuerpos

¹⁹ Petrus Gassendi, «De Lapidibus, ac metallis», en *Opera Omnia*, vol. III, página 101.

elementales, idea que Haüy había de completar casi dos siglos más tarde.

No podía faltar en Gassendi la indicación de que las masas de los cristales de cuarzo no son de forma cualquiera, «sino regulares y semejantes».

De todo lo que antecede podemos concluir que entre finales del siglo XVI y mediados del XVII existía ya la idea de que la forma (o figura, como ellos decían) de los cristales era un hecho natural y que esta forma era específica. Ahora sólo faltaba expresarlo en forma cuantitativa. Pero para esto se hubo de esperar unos cuantos decenios más.

LAS «TERRELAS» DE GILBERT

Como hemos visto en el capítulo I, tanto en la antigüedad como en la Edad Media existió un interés continuado por las propiedades extraordinarias de la piedra imán. Este interés creció considerablemente en el siglo XVI, debido a que los viajes marítimos de altura exigían tener un sistema de referencia fijo que permitiera conocer en todo momento la orientación del navío. No puede extrañar, por tanto, que esta necesidad obligara a estudios más profundos y exactos de la piedra imán, que servía como brújula. Resultado de esta necesidad fue la obra *De magnete*, que Gilbert publicó en Londres el año 1600.

William Gilbert (1544-1603) era oriundo de Colchester, Essex, en Inglaterra. Estudió medicina en Cambridge y siguiendo la costumbre de la época, una vez terminados sus estudios viajó por Europa durante unos cuatro años, visitando especialmente Italia. A su regreso a su tierra natal, en 1573, se estableció en Londres. Gilbert, que permaneció toda su vida soltero, debió alcanzar una gran fama como médico, pues llegó a ser Presidente del Real Colegio de Médicos, y finalmente médico de la reina Isabel en 1601, lo que no impidió que la reina falleciera dos años después, de hecho tal nombramiento. Ocho meses más tarde, la epidemia de 1603 acabó con el famoso médico.

El libro *De magnete* ²⁰ fue la culminación de una concienzuda investigación que Gilbert llevó a cabo en un largo período de unos veinte años, y en la cual llegó a invertir la considerable suma de cinco mil libras esterlinas. Su casa en Londres era, no sólo un laboratorio científico, sino la sede de una tertulia científica, precedente de las que sirvieron para formar la Royal Society casi un siglo más tarde. Gilbert fue no sólo un científico, sino un inventor cuya trascendencia es difícil de olvidar.

En cuanto a nuestra ciencia se refiere, la importancia de Gilbert es doble. Por una parte, nos interesan sus pensamientos sobre la piedra imán por ser ésta un mineral cuya propiedad física, el magnetismo natural, es característico de este sólido. Por otra parte, nos interesan sus ideas sobre el origen de los minerales. Empezaremos por este último punto.

Gilbert era un aristotélico que mantenía las antiguas ideas sobre el origen de los minerales. Según él, los minerales «consisten de un material doble, a saber, de materia fluida y húmeda, y de la materia más consistente y seca»²¹, indicando que

las gemas transparentes están constituidas por agua; como el cristal (cuarzo) que ha sido condensado de agua clara, no siempre por un frío muy intenso, como algunos suelen opinar, y por una helada muy intensa, sino otras veces por unos menos severo, influido por la naturaleza del suelo, los humores o jugos encerrados en ciertas cavidades, como los espátos se producen en las minas... Las escorias de los metales, así como los metales, piedras, rocas y maderas contienen mejor tierra, o están mezclados con una gran cantidad de tierra ²².

Esta idea de la forma de minerales a partir de soluciones, no es, con todo, tan clara en el caso de Gilbert como en el de Palissy que acabamos de ver. En este aspecto Gilbert es todavía un producto de la Edad Media, y así es en muchas partes de su obra. Su diferencia

²⁰ Guilielmi Gilberti Cohestrensis, Medici Londinensis, *De Magnete, Magneticisque Corporibus, et de magno Magnete Tellure, Physiologia novo, pherimis et argumentis et experimentis demonstrata*. London, Peter Short, 1600. Trad. inglesa. *On the magnet*, editada por Derek J. Price, Baris Books, Inc. New York, 1958, XI, 247 pp.; IV, 67 pp.

²¹ *On the magnet*, p. 51.

²² *On the magnet*, pp. 51 y 52.

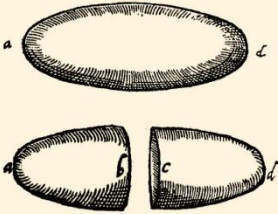


FIG. 3.- *Piedra imán y su corte, de Gilbert.*

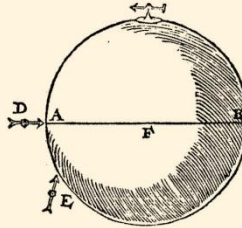


FIG. 4.- *Orientación de la aguja imantada sobre una piedra imán tallada en esfera, según Gilbert.*



FIG. 5.- *Armaduras sobre la piedra imán, según Gilbert.*

fundamental residió no tanto en sus ideas teóricas, como la utilización del método experimental.

Gilbert llevó a cabo su investigación utilizando piedras de distintas formas y dimensiones, hallando que las talladas en forma alargada eran las que producían imanes más potentes, comprobando, además, que al cortar una de esas piedras imán en dos cada parte se comporta como un imán independiente. Pero veamos su propia descripción:

Sea AB una piedra oblonga, en la cual A es el polo norte y el B el polo sur; cortémosla ahora en dos partes iguales. Se verá que el polo norte A se dirige al sur, como antes; de manera análoga el punto D se dirigió al norte, en la piedra dividida, como lo hacía en la piedra completa. Por el contrario, de las partes B y C, que antes eran continuas, y ahora están separadas, una, la B, es el polo sur y la C es el polo norte. B y C se atraerán, deseosas de estar unidas... pero si se dirige la parte A a la C en la otra piedra, una repele a la otra: pues así la naturaleza ha sido pervertida, y la forma de la piedra perturbada ²³.

Gilbert utilizó un método similar al de Pierre de Maricourd, trazando sobre una esfera tallada en piedra imán las líneas marcadas por una aguja móvil que denominó versorio, situada en su superficie. Esta esfera, que representaba en pequeño las condiciones imperantes en la Tierra, la denominó *terrella*, es decir, *tierrecilla*. Las líneas, o meridianos revelan en su intersección los polos norte y sur de la piedra imán. Gilbert corrigió la opinión de que el polo norte de la piedra imán se orienta al norte, cuando es lo contrario. Gilbert supuso que la electricidad producida por frotamiento era un efluvio material, análogo a un fluido muy tenue, mientras que la influencia magnética era una fuerza. Para él

El movimiento eléctrico es un reconocimiento de agregación de materia; el movimiento magnético es debido a disposición y forma ²⁴.

²³ *On the magnet*, pp. 16 y 17.

²⁴ *Ibid.*, p. 60.

Entre los inventos de Gilbert debemos mencionar el de las armaduras de hierro de la piedra imán, con las cuales observó que se aumentaba considerablemente el poder de la piedra imán.

EL LEGADO DE PLATÓN

El interés por los cristales de nieve que Kepler mostrara partía, como veremos, de las ideas de Platón. Estas ideas comprendían, tal como se ha dicho en el «Capítulo 1», la geometrización de la materia, mejor dicho, de los cuatro elementos y de la quintaesencia. La aplicación de dicha concepción al estudio de los cristales fue llevado a cabo por un escocés, William Davisson ²⁵ (o Davidson) que en 1648 fue encargado de química en el Jardín del Rey en París. A pesar de que dicho profesor de química consideraba los elementos tierra y agua como conceptos inútiles para la química, y que buscara «un principio vital ordenador de una ciencia mecánica», pensó, con todo, que las formas cristalinas derivaban de la combinación de las formas cúbicas de los cuerpos platónicos. La importancia de la forma cristalina aparecía ya con toda su amplitud, indicando a Davisson que ella se debía a una sustancia específica, que los yatroquímicos identificaban como la sal. Partiendo de la forma cúbica de la tierra, del tetraedro de fuego, del pentadodecaedro de la quintaesencia, del octaedro del agua y del icosaedro del aire, Davidson explicaba que las formas cristalinas irregulares no eran más que formas mixtas de las formas geométricas de los elementos simples.

UNA NUEVA TÉCNICA: EL MICROSCOPIO

Las observaciones que Kepler hiciera de la nieve fueron debidas, con toda probabilidad, a la existencia de un nuevo instrumento científico que en esos años fue inventado, y que el mismo Galileo había contribuido a desarrollar. Gassendi, en su obra citada, se

²⁵ Guillaume Davisson, *Philosophia pyrotechnica, seu cursus chymiatricus*, París, J. Bessin (1635 y 1640), 487 + 292 pp.

refiere varias veces al *engyscopio*, el microscopio simple, indicando la importancia que el instrumento tuvo en su época al hacer posible la ampliación hacia lo pequeño de las dimensiones que el hombre de ciencia podía observar.

La importancia del microscopio en nuestra ciencia fue tremenda, pues representó la iniciación de un cambio profundo en el estudio de los cristales. En realidad no sólo sirvió para hacer observables cosas que antes no podían verse, sino que representó un cambio en el mismo método experimental, al requerir el desarrollo de una técnica específica, la instrumentación científica, técnica que se desarrolló rápidamente, a partir del siglo XVII y que ha continuado hasta nuestros días. La invención y desarrollo de muchos instrumentos de observación obligó a que el método experimental identificara, cada vez con mayor claridad, la naturaleza del problema a investigar y la selección de la técnica instrumental adecuada al caso. Problemas y técnicas estarán desde ahora estrechamente unidos. Por ejemplo, se reconoció que cualquier avance en nuestro conocimiento debía estar precedido por la mejora de la técnica de observación, y al mismo tiempo, la existencia de nuevas técnicas de trabajo hizo posible series enteras de nuevos descubrimientos que iban a cambiar la faz de nuestra ciencia. La nueva técnica de observación subrayó la importancia de la observación cuidadosa, puesto que la interpretación y la comprensión de la naturaleza sólo se podían llevar a cabo a partir de la observación directa. Finalmente, la instrumentación científica, de la cual el microscopio era sólo un ejemplo, hizo posible la cuantificación del dato, con lo que la ciencia pasó de ser meramente descriptiva, a ser cuantitativa.

Este profundo cambio en el enfoque de la investigación científica fue formalmente introducido con la creación en Florencia de la Academia del Cimento. Florencia, bajo los Médicis, era el centro de la nueva ciencia en Europa. Todavía estaba viva la memoria de Leonardo y su revolucionaria visión de la naturaleza, cuando Florencia albergó dentro de sus murallas al genio de la ciencia moderna Galileo Galilei. La influencia y transcendencia de Galileo en la ciencia moderna es demasiado conocida para que hayamos de volver a ella una vez más. Lo que importa para nuestra historia es el hecho que alrededor de este excepcional hombre de

ciencia se formó un grupo dedicado al cultivo y dirección de la ciencia, y que este grupo mantenía reuniones en las cuales se efectuaban experimentos científicos de la mayor variedad, fundando así la Academia del Cimento.

Debido a la personalidad de Galileo y de sus seguidores, entre los que se contaba el gran experimentador Torricelli, la Academia del Cimento adquirió rápidamente fama internacional, y su ejemplo impulsó el nacimiento de una serie de instituciones científicas, la primera de las cuales fue la Academia de Sciences de París. En Inglaterra, y como resultado de una serie de reuniones más o menos informales en el Gresham College, se fundó la Royal Society. El desarrollo de la ciencia moderna debe gran parte de su éxito a la fundación y persistencia de estas instituciones científicas, sin las cuales mucho de lo que se dirá después en este libro no tendría sentido.

Todas estas instituciones científicas tenían como una de las misiones más importantes realizar experimentos científicos, experimentos que sirvieron para desarrollar la ciencia tal como la conocemos hoy en día. Estos experimentadores tuvieron decisiva importancia en el desarrollo de la ciencia de los cristales, y a ellos nos referiremos muchas veces en este libro. El primero que entró en escena fue Robert Hooke nombrado maestro de experimentos en la Royal Society desde 1662 hasta su muerte.

ROBERT HOOKE Y EL MICROSCOPIO

Robert Hooke (1635-1703) nació el 18 de julio de 1635 en la parroquia de Freshwater en la isla de Wight. Era el hijo del ministro de dicha parroquia, quien le enseñó las primeras letras, pues, siendo un chico enfermizo, Hooke no pudo estudiar y trabajar más que en su casa. Desde tierna edad Hooke demostró gran habilidad mecánica, habilidad que aumentó con los años y que le había de ser de gran utilidad en su notable vida científica. En 1635 ingresó en la Universidad de Oxford, donde, con el fin de ayudarse económicamente, entró al servicio de un tal Sr. Goodman. Su fama de inventor creció durante su estancia en la Universidad, de la que

obtuvo su Master de Artes a los veinticinco años de edad, edad bastante avanzada para la época. Durante su estancia en Oxford, Hooke colaboró con la Royal Society, que fue fundada en 1660. Debido a estos servicios y a haber logrado su título universitario, Hooke fue nombrado curator de la Royal Society en noviembre 1662. Su misión era llevar a cabo experimentos científicos y construir instrumentos científicos. Entre los instrumentos que construyó y perfeccionó en esta época se encuentra el microscopio compuesto, instrumento que, en sus manos, había de servir para ampliar considerablemente nuestra ciencia. Durante este tiempo la actividad científica de Hooke fue notable, especialmente en el campo de la microscopía, actividad que se tradujo en la presentación en las sesiones de la Royal Society entre 1663 y 1664 sus célebres observaciones microscópicas, con las cuales compuso un libro titulado *Micrographia* ²⁶ que publicó la Royal Society al principio de 1665. La obra atrajo inmediatamente la atención no sólo de los ingleses, sino de los hombres de ciencia europeos, mereciendo una importante nota bibliográfica en el *Journal des Scavans*, en diciembre de 1666.

Fue en esta época (1664) cuando Hooke fue nombrado conferenciante de la plaza creada por John Cutler que adjudicó 50 libras esterlinas para dicha cátedra. Como profesor de las Cutlerian Lectures, Hooke se labró gran notoriedad como científico, por su trabajo en temas tan dispares como estudios del péndulo, velocidad del viento, cuadrantes, telescopio e incluso como arquitecto, al inventar un modelo para la reconstrucción de Londres devastado por el gran incendio de 1666. En esta época, Hooke, que profesaba una teoría ondulatoria de la luz, y Newton, que mantenía la teoría corpuscular, expusieron sus teorías en la Royal Society; la teoría de Newton prevaleció en última instancia. Esta discusión y otras sobre la prioridad de la teoría de la gravedad, sirvieron para que entre estos dos sabios surgiera una mutua enemistad que duró hasta la muerte de Hooke en 1703.

²⁶ Robert Hooke, *Micrographia*. Royal Society, London, 1665. Reprint J. Cramer-Weinheim. Wheldon and Wesley Ltd. and Hafner Publishing Co. New York. 1961, 246 + Tabla.

Con Robert Hooke entramos de lleno en la ciencia de los cristales, gracias a las numerosas observaciones que incluyó en su *Micrographia*. Así, por ejemplo, Hooke describió la forma geométrica de la arenilla de la orina, de la que señaló que:

no sólo aparecen en forma de placas, sino que sus lados lo son en forma de rombos, romboides, y a veces rectángulos, y cuadrados ²⁷.

Estos cristales, que observó en su microscopio, los representó en una de sus láminas, y lo propio hizo con cristales diminutos de cuarzo. Hooke señaló también que la mica

termina, naturalmente, en aristas que tienen forma de un romboide ²⁸.

La observación de formas cristalinas en numerosos compuestos naturales le llevó a considerar que la regularidad geométrica de los sólidos era una propiedad general de los mismos, tal como puede verse en la frase siguiente:

Comprende en su extensión, todos los tipos de metales, todas las clases de minerales, la mayor parte de las piedras preciosas, todos los tipos de sales, multitud de tierras, ... y esta es otra propiedad que, aun cuando se ha tomado por muchos con harta superficialidad, no se ha intentado, que yo sepa, explicar por nadie ²⁹.

Fue esta curiosidad por la forma cristalina lo que indujo a Hooke hallar una explicación atomista de la misma, tal como veremos con mayor detalle en el Capítulo 3. Es cierto que las descripciones de cristales son, en Hooke, primitivas. Pero no es menos cierto que con él nuestra ciencia entra en el Camino cierto. No podía faltar en este autor la observación de la propiedad de la exfoliación, de la cual nos da una clara descripción en el caso de la mica:

²⁷ *Micrographia*, p. 81.

²⁸ *Ibid.*, p. 48.

²⁹ *Ibid.*, p. 85.

Está formada por un infinito número de finas hojuelas unidas o generadas una encima de la otra tan próximas y con tanta finura, que muchos cientos pueden hacerse de un placa fina y lisa de esta sustancia transparente y flexible, que con cuidado y diligencia puede ser separada en hojas tan finas que son difíciles de discernir a simple vista e incluso con un buen microscopio ³⁰.

La misma propiedad la reconoció en el yeso. Es de interés señalar que fue Hooke el primero en usar la palabra *cleaving* (*cleavage*) para la exfoliación, palabra que ha sido adoptada en idioma inglés. El uso de nomenclatura especial no se redujo a este nombre, sino que fue el primero, al menos en las obras que hemos podido estudiar hasta ahora, que utilizó la palabra *cristalización* como específica de la obtención de cristales a partir de soluciones. Pero Hooke no usó la palabra *cristal* en sentido general.

DENDRITAS

Quizás la contribución más importante de Hooke al estudio de los cristales fue el descubrimiento y descripción de las formaciones dendríticas, para las cuales propuso una nomenclatura que ha perdurado hasta hoy día. Gracias a su microscopio, este hábil observador estudió las formaciones dendríticas de nieve, hielo y orina «helada». La descripción se basa en su observación de esta última, cuya morfología compara con las frondas de helecho. Hooke distinguió las ramas principales que emergen de un centro; las ramas intermedias, que emergen de las principales; las ramas laterales que siendo paralelas a las principales, surgen de las intermedias; y otras ramas que sucesivamente denominó ramas colaterales, subcolaterales y laterosubcolaterales. Fue en este estudio de las formaciones dendríticas donde encontramos el primer dato de medición de ángulos en una formación cristalina. El dato tiene interés histórico, y por tanto, lo incluimos a seguido:

³⁰ *Ibid.*, p. 47.

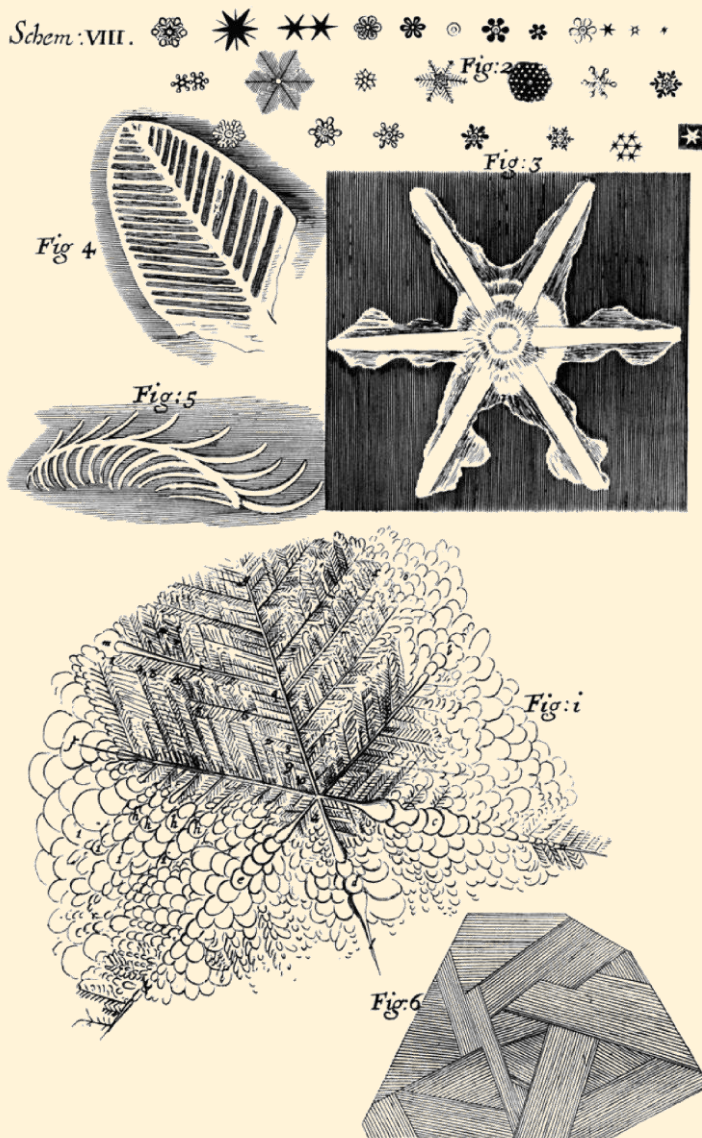


FIG. 6.- Dendritas y cristales de nieve, según Hooke.

... y están inclinadas unas con otras un ángulo muy próximo a los 60°, y digo muy próximo, porque habiendo tratado de medirlos lo mejor posible, con los compases más largos que pude obtener, no pude hallar diferencia sensible con esta cifra, aunque la figura total con seis ramas parece formar un ángulo sólido, con lo que dicho valor debía ser necesariamente menor³¹.

CRISTALES DE NIEVE

Desde el mismo momento que los cristales de nieve pudieron ser observados con el microscopio, simple o compuesto, constituyeron un material de estudio que atrajo numerosos investigadores, que deseaban observar la variedad y belleza de los mismos. Hemos visto, por ejemplo, que Olaus Magnus y Kepler fueron atraídos por estos intrigantes cristales. No podía faltar, por tanto, la contribución de los microscopistas de la época, y Hooke no podía dejar de acudir a la cita.

Recogiendo copos de nieve sobre un trapo negro o sobre un sombrero del mismo color, Hooke pudo observar que los cristales de nieve:

aunque difieran en su forma regular, siempre se presentan con seis ramas principales, todas ellas de igual tamaño, forma y constitución, emanando del centro, y cada una de ellas inclinada con respecto a las demás un ángulo de 60°³².

Otros hombres de ciencia fueron atraídos por el tema. Así vemos a Erasmo Bartholinus y a Christian Huygens, dos notables científicos que protagonizaran las páginas del Capítulo 4, entrar en el campo. Bartholino, por ejemplo, publicó en 1661 una memoria³³ sobre el asunto, mientras que Huygens, con anterioridad a la *Micrographia* o la *De figura nivis* recogió en sus papeles de trabajo una serie de dibujos de cristales de nieve. Otro notable microscopista

³¹ *Ibid.*, p. 89.

³² *Ibid.*, p. 91.

³³ Erasmus Bartholinus, *De figura nivis dissertatio*. Hafniae Typis Matthiae Gadichii. Simplicibus P. Hanboldi, 1661.

Antony von Leeuwenhoek (1632-1723) también fue atraído por el tema.

Los cristales de nieve que para Hooke eran todos del mismo tipo, es decir, dendritas de ritmo hexagonal, eran para Huygens de dos tipos bien distintos: dendritas hexagonales y prismas hexagonales; estos prismas eran simples o con bases extendidas. Estos cristales prismáticos tuvieron gran importancia en la explicación del halo solar, que llamó poderosamente la atención de los ópticos de la época, en especial Huygens y Newton.

STENSEN Y LA LEY DE CONSTANCIA DE LOS ÁNGULOS

Las observaciones sobre la morfología cristalina que hemos reunido en las páginas precedentes nos indica que no sólo se tenía conciencia de una constancia en la morfología de los cristales de una especie natural, sino que esta constancia se podía referir a ciertos ángulos que podían ser medidos. Esta preocupación por la medición de ángulos la hemos visto en Hooke. También Huygens tuvo esta misma urgencia, no sólo en los cristales de nieve, sino en el caso del yeso.

Si bien estos datos indican una preocupación cuantitativa en el estudio de los cristales, no culminó en generalización hasta la publicación del *Prodromus* de Stensen.

Nicolás Stensen (1638-1686) fue una de esas personas completas que el Renacimiento nos ha acostumbrado a considerar. Hombre de profundo conocimiento y convicciones religiosas, que empezó siendo protestante y terminó como Obispo y misionero católico, y finalmente beatificado por la Iglesia, fue también un famoso médico y diestro anatómico, que, además de fundar la Geología científica al descubrir el verdadero significado de los fósiles y de la estratigrafía, fue el fundador de la ciencia de los cristales.

Stensen, mejor conocido por el nombre Steno, nació el 20 de enero de 1638 en Copenhague; era el hijo de un herrero. A los dieciséis de edad, Stensen entró en la Universidad de Copenhague, donde inició sus estudios en filosofía, cambiando a medicina poco tiempo después. La Medicina era en la época de Stensen la Facultad

más científica del momento, lo que explica los numerosos médicos que contribuyeron en esta época al desarrollo de la ciencia moderna. Stensen tuvo la fortuna de tener como preceptor a Thomas Bartholinus (1616-1680) un famoso médico y anatómico. Este hombre de ciencia fue algo más que un simple preceptor, comportándose para con Stensen como un segundo padre, relación que duró aparentemente durante la mayor parte de la vida de ambos. Probablemente aconsejado por Thomas Bartholinus, Stensen se trasladó, siguiendo la costumbre de la época, a otros países para continuar sus estudios. En 1660 lo encontramos en Holanda, en la Universidad de Leiden, donde trabajó con otro célebre anatómico, Gerard Blasius (ca. 1625-1682), logrando su título de Medicina en dicha Universidad en 1664. Esta acertada formación médica aseguró a Stensen un rápido crédito, y fue precisamente en el campo de la anatomía humana donde llevó a cabo sus descubrimientos más importantes. Stensen llegó a tener gran fama como médico, tanto que fue nombrado en 1666 médico de corte del Gran Duque de Toscana, Fernando II de Médicis (1610-1670). La estancia en Florencia fue decisiva tanto para la vida científica como religiosa de Stensen.

Cuando Stensen llegó a Florencia, esta ciudad todavía mantenía mucha de su pasada preponderancia científica en Europa. El clima científico era único, pues la memoria de Leonardo, Galileo y Torricelli todavía era actualidad en dicha ciudad. La Academia del Cimento seguía funcionando bajo la dirección de Vincenzo Viviani, médico de la corte de los Médicis. Ni que decir tiene que Stensen llegó a ser íntimo de este gran hombre de ciencia. Desgraciadamente, la vida de la Academia era ya precaria en dicha época, ya que la última sesión tuvo lugar el 5 de marzo de 1667, unos meses después de haber llegado Stensen a la ciudad. La publicación de los célebres *Experimentos florentinos* por la Academia en julio de dicho año constituyó en realidad el óbito de las actividades de dicha institución. A pesar de todo, el clima y el interés por lo científico seguía vivo en la ciudad de Florencia. Fue en este ambiente donde Stensen desarrolló su interés por problemas geológicos gracias a una circunstancia única.

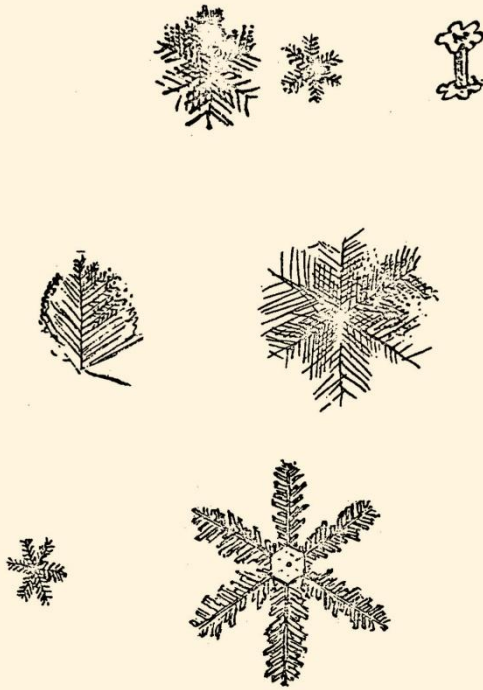


FIG. 7.-Cristales de nieve, según Huygens.

En octubre de 1666, al poco tiempo de llegar Stensen a Florencia, apareció un gigantesco tiburón arrojado por el mar a las playas de Livorno, al norte de Roma. El interés por la pieza debió ser grande, y el mismo Gran Duque hizo que la cabeza del monstruo fuera entregada a Stensen para que estudiara su anatomía. Entre otras cosas, Stensen observó que los dientes del tiburón que estaba estudiando eran muy semejantes a las *glossopetras*, piedras en forma de punta de flecha que existían en Malta y que una piadosa tradición asociaba a los dardos vocales de San Juan Crisóstomo. Stensen, al identificar de manera indudable que las *glossopetras* no eran sino dientes de tiburones que debieron existir en tiempos pretéritos, no sólo dio una interpretación correcta a los fósiles, sino que estableció las bases de la geología moderna. El resultado de su investigación fue publicado en su obra *Canis Carchariae Dissectum Caput* ³⁴, que Stensen publicó en Florencia en 1667, un año después de llegar a la ciudad.

Este descubrimiento atrajo a Stensen al campo de la investigación geológica. Si las *glossopetras* no eran piedras figurativas, sino restos de animales de otras épocas, ¿qué sucedía, se preguntó Stensen, con los otros minerales que se encontraban dentro de las rocas? ¿Cuál es la secuencia en la deposición de los materiales terrestres que se observan en los estratos? Y así, de una pregunta a otra, el eminente anatomista se transformó rápidamente en el anatómico de los procesos geológicos. Dos años de actividad inusitada demuestran el febril interés de Stensen en este campo. En 1669 publicó en Florencia *De solido intra solidum naturaliter contento dissertationis prodromus* ³⁵, que dedicó a Fernando II, duque de Toscana. Su interés por los problemas geológicos no se paró aquí,

³⁴ Nicolaus Stensen, *The earliest geological treatise* (1667). Trad. inglesa por Axel Garboe. *De Canis Carchariae Dissectum Caput*. McMillan and Co., Ltd. London, 1958, 51 pp.

³⁵ Nicolaus Steno, *The prodromus of Nicolaus Steno's Dissertation concerning a solid body enclosed by process of nature within a solido* Trad. inglesa por John Garret inter. University of Michigan. Humanistic Studies. Vol. XI, pt. 2, 1916. Edición facsimile por George W. White. Hafner Publishing Company, Inc., New York, 1968, VII + (169-283).

como se demuestra por su correspondencia en 1671 sobre sus investigaciones de grutas alpinas. Como resultado de su interés por lo mineralógico y geológico, Stensen coleccionó una gran variedad de minerales, muchos de ellos cristalizados, así como variados fósiles. La mayor parte de estos ejemplares fueron coleccionados entre 1668 y 1670, Y sin duda sirvieron para elaborar su *Prodromus*. Evidencia es la existencia de un *Índice di cose naturali, forse dettato da Nicolo Stenone* ³⁶.

IDEAS DE STENSEN SOBRE LOS CRISTALES

Como la ciencia de los cristales toma forma con el *Prodromus* de Stensen, vale la pena considerar aquí las ideas principales que aquel gran hombre de ciencia tuviera acerca de los sólidos cristalizados. De todos los temas tratados en dicha obra, tales como la formación de montañas, naturaleza de los fósiles y piedras figurativas, interesan a nuestro relato las que se refieren a la formación de sólidos cristalizados, y en especial las que tratan de la naturaleza, origen, crecimiento y morfología de los cuerpos angulares (cristales, en nomenclatura moderna).

Aunque Stensen no se declaró atomista, estas ideas estaban implícitas en su distinción entre sólidos y fluidos:

Un sólido difiere de un fluido en que en un fluido las partículas imperceptibles están en continuo movimiento, y apartadas mutuamente entre sí; mientras que en un sólido, aunque dichas partículas imperceptibles puedan en ciertas circunstancias estar en movimiento, difícilmente se separan entre sí mientras el sólido permanece como tal ³⁷

Para Stensen la distribución de las partículas tenía decisiva importancia en la formación de los cuerpos angulares. Según él,

³⁶ Gustav Scherz (Editor). *Dissertations on Steno as geologist*. Acta Historica Scientiarum Naturalium et Medicinalium, vol. 23. Ordensee University Press.

³⁷ *Prodromus*, p. 214.

Un cuerpo crece sólido mientras nuevas partículas se añaden a sus partículas ³⁸.

Stensen mantenía que la causa eficiente de la formación de cuarzo (cristal, como él lo denominaba de acuerdo con la costumbre de la época), no era el frío extremo que se suponía en otros tiempos, sino la presencia de soluciones o exhalaciones. Creyó también este autor que el crecimiento se producía por adición de partículas poco a poco a sus planos externos, señalando que esta adición (o aposición) se llevaba a cabo a través de dos movimientos distintos: según uno de ellos, las partículas se mueven de la solución al cristal, mientras que por el otro movimiento las partículas se distribuyen en la superficie del mismo. Aunque Stensen no elaboró la creación de un núcleo inicial, su necesidad fue claramente establecida en lo que sigue:

El lugar donde la primera solidificación se inicia, sea entre un fluido y otro fluido, o entre un fluido y un sólido, o en el mismo fluido, puede ser dudoso; pero el lugar en el cual el cristal crece una vez se ha iniciado, es un sólido en aquel lugar donde está adherido, sea una piedra u otro cristal ya formado ³⁹.

Stensen estaba interesado, como buen anatómico que era, en la descripción de la morfología de los cristales, y es con este autor cuando dicha descripción adquiere aspecto moderno. Veamos algunas de sus descripciones:

Un cristal (cuarzo) consiste en dos pirámides hexagonales y un prisma intermedio también hexagonal. Denomino a aquellos ángulos sólidos terminales, que forman las puntas de las pirámides, mientras que ángulos sólidos intermedios son los que se forman por la unión de las pirámides con el prisma. De la misma manera, denomino planos terminales a los de la pirámide y planos intermedios a los del prisma. El plano de la base es la sección perpendicular a todos los planos intermedios; un plano del eje es

³⁸ *Prodromus*, p. 220.

³⁹ *Prodromus*, p. 237.

una sección que pasa por el eje del cristal, y consiste en los ejes de la pirámide y los ejes del prisma ⁴⁰.

Esta es la primera vez que en una descripción de un cristal se utiliza un sistema de ejes de referencia, probablemente consecuencia del cartesianismo imperante en la época. Pero no fue esto sólo. Como buen anatómico que era, Stensen paró mientes en el aspecto físico de las caras del cristal, como podemos ver en la descripción de un cristal de hematites de la isla de Elba:

La forma de la hematites está limitada por dichos planos, de los cuales los doce terminales son brillantes, mientras que los seis intermedios son estriados. En la segunda clase de hierro, sin embargo, sólo doce planos se observan, de los cuales seis son terminales y estriados, mientras que los seis intermedios son brillantes; y en la tercera clase hierro se pueden contar veinticuatro planos, de los cuales los tres terminales son estriados, y los dieciocho intermedios brillantes. Entre los planos terminales a veces se encuentran otros planos brillantes que parecen lados truncados de pirámide triangulares ⁴¹.

En otra descripción, esta vez la pirita (que él llamaba marcasita) nos dice:

A veces forma paralelepípedos rectangulares que, de acuerdo con la manera corriente de hablar, llamaremos cubos, aunque la regularidad en todas sus caras se encuentran sólo en unos pocos ⁴².

Y así sucesivamente en otros casos, que no vamos a citar para no cansar al lector.

A pesar de que Stensen se refirió a la exfoliación, como en esta cita:

Hay también cuerpos angulares que se fragmentan en hojas, como el yeso romboidal, que se presenta en cuerpos romboidales que se rompen en otros cuerpos también romboidales ⁴³,

⁴⁰ *Prodromus*, p. 237.

⁴¹ *Prodromus*, pp. 244 y 245.

⁴² *Prodromus*, p. 247.

⁴³ *Prodromus*, pp. 248 y 249.

no dio mayor importancia a dicha propiedad.

Stensen no sólo nos legó las primeras descripciones científicas de cristales, sino que también fue el primero en representarlas adecuadamente. Para ello produjo no sólo dibujos de caras de cristales, sino que preparó plantillas, al modo de Durero, para la construcción de sólidos cristalográficos. Dos de ellas se incluyen en la obra, y ambas corresponden a cristales de hematites de la isla de Elba. La figura 14 de la lámina X representa dos tipos de caras, las estriadas corresponden a lo que hoy se conoce como el romboedro $\{01\bar{1}4\}$ asociado al prisma hexagonal. El modelo del cristal de la figura 17 de la misma lámina está formado por la cara dominante $\{01\bar{1}1\}$, las caras estriadas triangulares corresponden al romboedro $\{10\bar{1}4\}$ más seis pares de caras del escalenoedro trigonal $\{32\bar{5}3\}$ con unas facetas pequeñas del romboedro $\{01\bar{1}4\}$ ⁴⁴.

Aunque Stensen no hizo referencia alguna en sus descripciones a la simetría de los cristales, esta simetría estaba implícita en su mente, tal como puede comprobarse por sus dibujos, al hacer iguales las dimensiones y perímetro de caras equivalentes por simetría, igualdad que, evidentemente, no pudo observar literalmente en los cristales por él estudiados. Es esta idealización de forma lo que hizo posible, algún tiempo más tarde, el descubrimiento de la simetría cristalina, y de las formas simples y compuestas.

Pero no se paró aquí. Del estudio de una serie de cristales de cuarzo, Stensen llegó a la enunciación del segundo principio en la historia de la ciencia de los cristales. Se trata de la ley experimental de la constancia de los ángulos entre caras equivalentes en diferentes cristales de la misma especie. Stensen tan convencido estaba de la realidad de este hecho experimental, que no le debió parecer necesario incluirlo, a pesar de su importancia, en el texto del *Prodromus*. Por el contrario, fue sólo en la explicación de una figura, concretamente la figura 13 de su lámina IX, en la que llamó la atención sobre el hecho, tal como se cita a continuación:

⁴⁴ Según H. Tertsch, *Niels Stensen und die Kristallographie*. En Scherz, 1958, p. 177. Citado por C. J. Schneer, *Steno; on crystals and the corpuscular theory*. Dissertations on Steno as geologist. Editado por Gustaw Scherz. Odensee University Press, 1971, pp. 293-307.

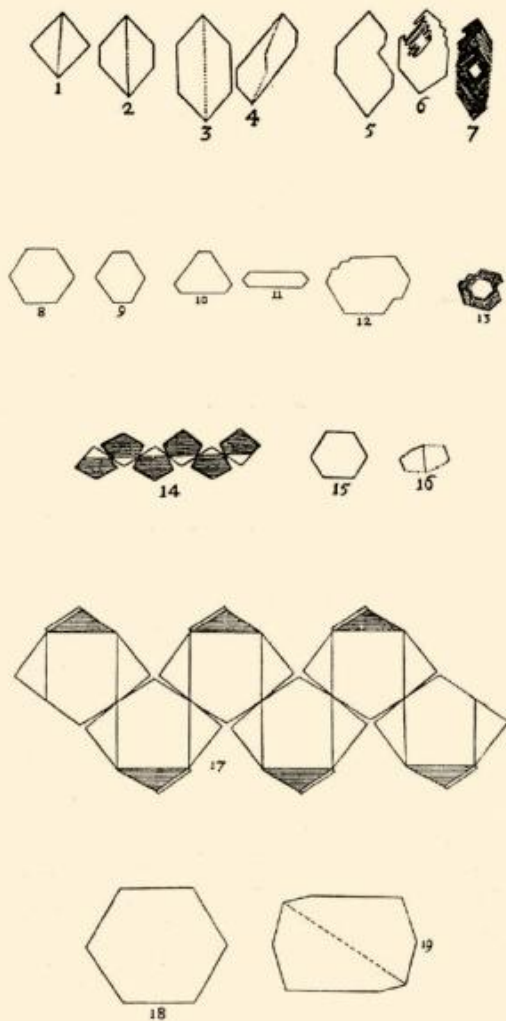


FIG. 8.- Lámina de Stensen, por la que ilustraba la constancia de los ángulos y la construcción de cristales en cartulina.

a veces las dimensiones y número de lados (de las caras) se alteran de varias formas sin cambiar sus ángulos ⁴⁵. Este principio fue utilizado por Stensen implícitamente también en los dibujos de los cristales que incluyó en su obra. Como Nicolás Stensen fue el primero en enunciar explícitamente este hecho, se le considera como el fundador de la ciencia de los cristales, y como la obra fue publicada el año 1669, se toma esta fecha como la del nacimiento de nuestra ciencia. A partir de esta fecha sólo era necesario que la ciencia de los cristales creciera y se desarrollara, y a ello iban a contribuir una pléyade de hombres de ciencia venidos de todos los campos y de las tierras más dispares.

BOYLE Y EL CRECIMIENTO DE LOS CRISTALES

La obra de Stensen prontamente fue conocida en otras partes de Europa. Justamente se la consideró como una aportación fundamental en el campo de la geología, y como tal, meritoria de ser traducida. Entre estas traducciones merece ser citada la inglesa. En general no nos interesa citar las traducciones que una obra pudo tener, pues aunque puedan tener valor para indicar el posible impacto que una obra tuvo en la ciencia, ello nos llevaría muy lejos del fin que nos hemos propuesto al redactar este libro. Con todo, la traducción inglesa nos interesa excepcionalmente porque su ejecución está asociada a un personaje que merece ser incluido en nuestra historia.

El traductor de la obra de Stensen fue un personaje curioso en el comedero científico inglés de la época. Este personaje era Henry Oldenburg (1615-1677) un alemán que vivía en Londres y que fue en aquella época el Secretario de la Royal Society. Este personaje mantenía correspondencia con casi todo el mundo científico de la época y sus noticias y comunicaciones jugaron un papel importante en muchos casos donde la prioridad de un hallazgo estaba en entredicho. Es en este contexto cuando cobra interés la visita que le hiciera Robert Boyle, el científico más importante de Inglaterra de su tiempo, cuando Oldenburg se encontraba en plena traducción de la

⁴⁵ *Prodromus*, p. 273.

obra de Stensen. La razón de la visita era convencer a Oldenburg y a través de él al mundo científico, que él, Robert Boyle, había llegado, con completa independencia de Stensen, a conclusiones muy similares, si no idénticas a las suyas. Probablemente Boyle convenció a Oldenburg porque la traducción que apareció en el 1671, sólo dos años después de la publicación original, iba precedida por un prefacio en el cual el traductor se refería a un trabajo todavía no publicado de Boyle, y que había visto. Acuciado por la urgencia y para no perder la prioridad, Boyle publicó al año siguiente un *Ensayo sobre el origen y las virtudes de las gemas*, donde su autor se aseguró una vez más de dejar bien claro que sus observaciones y conclusiones eran independientes de las de Stensen.

Robert Boyle (1626-1691), el decimocuarto hijo del Duque de Cork, tuvo la suerte de combinar inteligencia con riqueza, lo que le permitió dedicar su vida a la ciencia sin preocupaciones económicas. La ley de los gases, que lleva su nombre, nos indica hasta qué punto Boyle logró el reconocimiento imperecedero de la ciencia. Cuando publicó su *Ensayo* ⁴⁶ Boyle tenía cuarenta y seis años, y estaba casi paralítico como resultado de un ataque que sufrió en 1670. Los dos decenios anteriores a la publicación de la obra que estamos considerando vieron a Boyle transformado en un científico profesional. En su residencia de Oxford, creó un laboratorio de investigación en el que mantenía una serie de asistentes, entre los cuales figuró nada menos que Robert Hooke. Alrededor de 1670, Boyle se trasladó a Londres, donde la Royal Society, que había sido fundada hacía poco, iba a proporcionar a Boyle el ambiente científico que necesitaba. Su casa de Pall Mall, en Londres, fue desde que fijó su residencia en 1668, el punto de reunión de importantes personajes científicos, así como el lugar de cita de todo sabio extranjero que llegaba a Inglaterra. Entre ellos se encontraron, Huygens, el óptico, y Duhamel el Secretario de «L'Academie des Sciences» de París.

Boyle fue sin duda el mayor científico inglés de su tiempo, y el miembro más influyente de la Royal Society. Pero sobre todo Boyle

⁴⁶ Robert Boyle, *An essay about the origine and virtues of gems*. William Godbid, London, 1672 (13), 185 pp. Edición facsímil. Hafner Publishing Co., New York, 1972, vol. 7, de «Contributions to the History or Geology».

fue un científico universal; gracias a él el atomismo, como veremos en un próximo capítulo, se acreditó en su país. A parte de todos estos detalles de Boyle como científico, el *Ensayo sobre el origen y virtudes de las gemas*, que no fue su obra cumbre, tiene especial interés para nosotros.

El libro trata del origen y crecimiento de los cristales en general. Boyle, como Stensen, creía que los minerales cristalizados habían sido resultado de la cristalización de soluciones. Así, dice:

Muchas de estas gemas, y piedras medicinales, fueron una vez cuerpos fluidos, como los transparentes, o hechos en parte de sustancias que fueron en algún tiempo fluidos ⁴⁷.

Boyle nos explica la formación de los cristales a partir de soluciones de la siguiente forma:

El origen que he atribuido a las gemas puede también deducirse por la forma externa de varias de ellas. Pues claramente vemos que los corpúsculos de nitro, aluminio, vitriolo, e incluso la sal común, cuando coagulan en el líquido donde antes nadaban, se unen en cristales de forma curiosa y fija ⁴⁸.

En esta última frase indica claramente su creencia en la constancia de la forma cristalina de una especie dada, que como hemos visto, constituyó uno de los descubrimientos del siglo XVII. Boyle reconoció también que esta forma podía ser modificada, o alterada en parte, por las condiciones mismas del crecimiento. Así nos lo indica en el siguiente texto:

pues cuerpos concrecionantes, como así dijera, si no poseen espacio suficiente en el ambiente fluido para reunir sus partes, no pueden resultar en formas finas y regulares ⁴⁹.

⁴⁷ Boyle, *An essay...*, p. 5.

⁴⁸ Boyle, *Ibid.*, pp. 7 y 8.

⁴⁹ Boyle, *Ibid.*, p. 8.

Los cristales eran para Boyle el resultado de la agregación de partículas, tal como lo expresa en el siguiente párrafo:

La sal común debe estar formada por pequeñas partículas salinas, que siguiendo una yuxtaposición conveniente se asocian en grandes grupos, muchos de los cuales tienen la forma cúbica ⁵⁰.

Como había observado Stensen, los cristales crecen, según Boyle, mediante la formación de capa tras capa. Así dice que:

Generalmente parecen avanzar... en placas planas extraordinariamente finas; a pesar de ello, sucede muchas veces que en la coagulación muchas de estas placas finas se unen con sus lados llanos unas sobre otras, y llegan a formar cristales gruesos y bien grandes, cuyo exterior será finamente ejecutado con la forma peculiar del vitriolo ⁵¹.

Que el cristal crecía por aposición de hojas quedaba confirmado, según nuestro autor, por la textura del cristal mismo y por la existencia de la exfoliación, que Boyle atribuyó a la manera propia de crecer y formarse los cristales según laminillas. La exfoliación de la mica era un ejemplo bien conocido, y Boyle no duda en señalar que la presencia de hojas en la mica es una prueba de su formación a partir de soluciones. Buen observador como era, nos proporciona un buen ejemplo en lo siguiente:

Con el fin de examinar esta hipótesis, tomé unas cuantas de estas piedras que poseían la forma geométrica en parte de su superficie, y que, por otra parte, no daban pruebas bastantes para pensar que habían sido en otro tiempo sustancias fluidas, y habiéndose analizado diligentemente aquellas que parecían tener la mayor probabilidad de satisfacerme, percibí manifestamente, no sólo con ayuda de una lupa, sino incluso a ojo desnudo numerosas comisuras paralelas, que parecían ciertamente formadas por las aristas contiguas de una serie de placas finas de piedra, como si estuvieran reposando unas sobre otras, casi como las hojas de un libro medio abierto ⁵².

⁵⁰ Boyle, *Ibid.*, p. 18.

⁵¹ Boyle, *Ibid.*, p. 18.

⁵² Boyle, *Ibid.*, p. 20.

Boyle creyó que estas laminillas existían en todo cristal. Y así las describe en otras gemas, entre ellas el diamante y los granates. En este último caso dice:

donde, especialmente cuando se rompen, los bordes y comisuras de las placas delgadas u hojas delgadas, de las que están formados, eran fácilmente visibles ⁵³;

o al referirse al diamante,

Y estas hojuelas paralelas junto con sus comisuras pueden incluso ser vistas a simple vista en diamantes algo grandes ⁵⁴.

Boyle, que tenía especial interés en el estudio de los colores, suponía que la materia colorante se intercalaba entre las laminillas del crecimiento. Si el crecimiento se alteraba, la distribución de la materia colorante se alteraba a su vez, dando lugar a cristales con una colaboración variable de un extremo a otro, tal como había sido observado por José de Acosta en las esmeraldas un siglo antes. Pero Boyle, a diferencia de Acosta, explicó la variación del colorido de un ejemplar cristalino como el resultado de un proceso de crecimiento.

A pesar de sus prisas, Boyle sólo pudo demostrar que, en efecto, su idea sobre cómo crecen los cristales era idéntica a la de Stensen, lo que no era imprevisible, pues constituían ideas que estaban en la mente de todos. Pero Boyle se quedó corto frente a Stensen en cuanto a la descripción de la morfología de los cristales y a su representación gráfica. Y sobre todo, Boyle no se dio cuenta de la constancia de los ángulos. Por todo ello, Stensen conserva su título de fundador de la ciencia de los cristales.

⁵³ Boyle, *Ibid.*, p. 21.

⁵⁴ Boyle, *Ibid.*, p. 22.

3. DEL ATOMISMO AL EMPAQUETADO DE BOLAS

EL ABANDONO DEL ARISTOTELISMO

En el capítulo anterior hemos visto cómo, paso a paso, pero en constante progresión, los científicos del siglo XVII tuvieron conciencia no sólo de la existencia de la forma geométrica de los cristales, sino que se percataron de su importancia y de la necesidad de estudiarla. A este punto llegaron debido a que se había producido en la mente del hombre de ciencia un cambio profundo, cambio que era algo más que una manera consciente de observar la naturaleza. El descubrimiento de la forma cristalina de los minerales fue, en efecto, el resultado de un abandono completo de la antigua forma de pensar. Con todo, este abandonar viejos moldes y seguir caminos nuevos ocurrió, no de manera súbita, sino lentamente, de tal manera que incluso se puede seguir dicho cambio a lo largo de la vida misma de los investigadores que lo protagonizaron. A pesar de que hemos señalado ya algunas de las ideas que contribuyeron a esta nueva manera de pensar, vale la pena, en este momento, examinar otras facetas de este cambio profundo en la mentalidad del científico.

En términos generales, el enfoque seguido en el estudio de los minerales antes de Agrícola se caracterizaba por la aceptación de una tradición, tradición que se consideraba contenía todas las bases necesarias para ser creída. En efecto, el siglo XIII representó el triunfo del aristotelismo en el mundo de las ideas, triunfo que puede representarse por la aceptación del Tomismo.

El modelo del mundo físico según el aristotelismo se basaba en una serie de postulados. Uno de ellos era la existencia de una materia continua, que llenaba, sin discontinuidad, todo el espacio. La existencia de este continuo, impedía la existencia del vacío, de donde la frase escolástica de que «la naturaleza aborrece el vacío». Otro postulado suponía que la materia primaria estaba diferenciada en cuatro elementos, a saber agua, aire, tierra y fuego en el espacio sublunar, es decir, en la tierra, y que estos elementos poseían ciertas cualidades específicas asociadas, tales como húmedo, seco, frío y calor. Llenando las esferas celestes se hallaba un quinto elemento, la quintaesencia o el éter, que carecía de cualidades específicas, excepto su extrema ligereza. Debido a este postulado, que podemos llamar postulado de los cuatro elementos, todo ser natural estaba formado por la asociación de dichos elementos en proporciones dadas, y sus propiedades, consecuentemente, dependían de dichas proporciones, puesto que afectaban a las cualidades preeminentes. Una consecuencia de la teoría o quizás otro postulado concebía que las cualidades y los elementos podían permutarse entre sí en forma cíclica.

Con los últimos peripatéticos, y en especial al final de la Edad Media, las cualidades formales fueron interpretadas cada vez más como verdaderas formas sustanciales, de tal manera que cada una de las propiedades posibles de los cuerpos se consideraba poseer forma real y propia. Conceptos tales como gravedad, color y luz tenían forma, lo que equivale a suponer que tenían existencia material, es decir, que eran materia en nuestra manera de decir las cosas.

La transformación cíclica de cualidades y elementos, es decir, el paso de uno a otro, se consideraba como posible, idea que constituyó la base teórica y práctica de la Alquimia. Según la teoría aristotélica, un elemento podía transformarse en otro mediante un cambio de su forma; ciertos cambios, como los de color, eran fácilmente accesibles; mientras que otros, como la maleabilidad, ductilidad, densidad o compactación eran, evidentemente, más difíciles o imposibles de determinar en la práctica, aunque siempre eran posibles teóricamente. No vamos a extendernos aquí en el imposible sueño de la Alquimia; lo único que nos interesa en este momento es indicar que tal suerte de cosas constituía el conocimiento aceptado al final de

la Edad Media, y que dicho conocimiento aceptado perduró en la ciencia, o en la pseudo-ciencia, occidental al menos un par de siglos más, pasando por el Renacimiento y llegando incluso al siglo XVII.

Lo que sí es importante en nuestro relato es darse cuenta de que, a pesar de la debilidad interna de la teoría, la Alquimia era una ciencia, o pseudo-ciencia, si se prefiere, que se basaba en el experimento, y que el método experimental, o su equivalente, el método empírico, constituía el método normal de la investigación científica. Lo que era erróneo era la teoría, y por tanto la interpretación de los hechos experimentales debía ser necesariamente errónea. El método experimental, por sí solo, no podía en tales circunstancias cambiar la marcha de la ciencia. Por otra parte, la teoría de los cuatro elementos era, fundamentalmente, una teoría cualitativa, pues las propiedades, definidas sólo en forma cualitativa, eran el resultado de la preponderancia de un elemento, con sus cualidades específicas, sobre otro. Con la teoría de los cuatro elementos, no existió jamás la posibilidad de hacer la ciencia cuantitativa, puesto que, evidentemente, los elementos supuestos no se podían aislar. Y la ciencia no podía avanzar a menos de hacerse cuantitativa.

Se hace muy difícil para nosotros, que vivimos en el siglo XX, darnos cuenta cabal de las enormes inquietudes intelectuales que debían tener los científicos del siglo XVI. Hacía poco que un nuevo mundo acababa de ser descubierto, mundo que representaba un hecho experimental no previsto por ninguna teoría, aceptada o no. Este descubrimiento añadió al acervo científico un sinnúmero de nuevos datos y observaciones, resultado de la observación directa de la naturaleza. Por otra parte, y con la ayuda de nuevos y mejores instrumentos de observación, se hizo posible establecer un sistema del universo en conflicto con las ideas aceptadas. Estas dos experiencias, de magnitud colosal y totalmente imprevisibles, llevaron al pensador al conflicto consigo mismo y con las ideas tradicionales. Era necesario buscar nuevos caminos en la búsqueda científica. Entre otras cosas, este conflicto llevó al abandono progresivo de los métodos escolásticos tradicionales, llamando la atención hacia la importancia que tiene el método experimental,

basado en la observación directa de la naturaleza y en preguntar a la naturaleza directamente, para buscar una interpretación plausible.

EL ATOMISMO REDESCUBIERTO

A parte de estos hechos, otros factores intervinieron a su vez en forzar el cambio que se estaba llevando a cabo en la mentalidad de los científicos. Si no otra cosa, el Renacimiento representó rechazar el pensamiento de la Edad Media y la vuelta a las ideas griegas. Debido a esta actitud, es natural que se buscaran aquellas teorías que, iniciadas por los mismos griegos, se opusieran al pensamiento aristotélico, que se consideraba representante del pensamiento filosófico de la Edad Media, que el Renacimiento rechazaba. Por esta razón se inició un movimiento que concedía la mayor importancia a las ideas atomísticas, que el aristotelismo no aceptaba. Este movimiento se inició al descubrirse, durante el Renacimiento, la obra *De rerum natura*, el poema latino de Lucrecio. Este poema fue inicialmente aceptado como una obra literaria, pero bien pronto se transformó en la fuente de la filosofía epicúrea, y con ella, del nuevo concepto de una materia basada en la existencia de átomos. Redescubierto el atomismo griego, constituyó la base teórica de la nueva física que se estaba desarrollando en aquellos momentos.

¿Cuáles eran los postulados fundamentales del atomismo griego? Como hemos visto en el Capítulo I, para los atomistas griegos la materia estaba constituida por una sustancia única y primaria, formada a su vez por partículas indivisibles, los átomos, separados entre sí por vacío. Esta idea constituye lo que podemos considerar como el postulado atómico. A este postulado se añadía un segundo, que se refiere a las propiedades de estos átomos. Los atomistas los creían desprovistos de cualidad, excepto que tenían una forma determinada, que tenían un tamaño finito, aunque muy pequeño, y que los átomos eran inmutables y, por tanto, eternos. Finalmente los átomos ocupaban un volumen y no podían solaparse el uno en el otro. Un tercer postulado del atomismo decía que las propiedades físicas (las cualidades, como ellos decían) de la materia eran el resultado del tipo de agregación de los átomos que la

formaban. Finalmente, un cuarto postulado añade que los átomos poseían la posibilidad de movimiento, mejor dicho, que el movimiento era inherente a ellos.

Como puede verse, las ideas atómicas de los griegos eran muy sencillas, tanto que el atomismo debió desarrollarse con independencia en la mente de cada pensador, especialmente en los que lo propusieron de nuevo en el siglo XVII. Uno de los precursores de la nueva idea fue Giordano Bruno (1548-1600), que murió en la hoguera el mismo año que Gilbert publicara su estudio de magnetismo. Para Bruno, los átomos eran irrompibles, todos ellos idénticos y de forma esférica; esta forma era la consecuencia de la necesidad de ocupar el volumen mínimo, como claramente indica su frase:

Figura minimi plani circulus est, minimi solidi globus ¹.

Discutiendo lo infinito, Bruno decía:

Esta infinidad no es un continuo, sino más bien está formado por discretos (partículas) contenidos en un continuo infinito que es el espacio.

Para él, estos discretos eran los átomos, cuerpos materiales de tamaño tan pequeño como se quiera, pero cuyas dimensiones no son nulas. Bruno comparaba, en *De immenso*, los cuerpos compuestos a las palabras de una frase, los cuerpos simples a las letras que forman el alfabeto y los átomos a puntos, todos ellos idénticos, pero cuyo conjunto y disposición varía en cada letra. Quizás nadie ha explicado esta parábola de manera más clara y atractiva que Boscovich, casi dos siglos más tarde. De este autor trataremos en otro capítulo de este libro. Pero vale la pena reproducir aquí su alegoría, pues ilustra de manera admirable las ideas que tenían los atomistas.

Supongamos, decía Boscovich, que hemos formado letras no mediante un trazo continuo de tinta, sino mediante pequeños puntos negros cuyas

¹ Citada por Paul-Henri Michel, «L'atomism de Giordano Bruno», en *La science au seizième siècle*. Colloque de Royaumont, 1957. Histoire de la Pensée II. Hermann, Paris, 1960, pp. 248-263.

distancias mutuas son pequeñas, pero cuyos intervalos no pueden verse sino con la ayuda de un microscopio, y que de estas letras pueden hacerse tipos de imprenta formados por puntos redondos muy próximos entre sí. Imaginemos ahora que poseemos una enorme biblioteca, cuyos libros están escritos con letras de molde, y que hay en ella una increíble cantidad de libros escritos en idiomas distintos, todos los cuales utilizan los mismos tipos. Si una persona cualquiera, ignorante del contenido y de los idiomas de los libros, inicia un estudio cuidadoso de ellos, todo lo que reconocerá es que unos son distintos de los otros; entonces lo primero que encontrará es un conjunto de palabras, algunas de las cuales se presentan en ciertos libros, mientras que otras aparecen en otros. Así, dicha persona, compondrá léxicos, tantos como idiomas; en cada uno de ellos encontrará todas las palabras que componen un idioma, y estos serán, en realidad, un corto número; pues la inmensa multiplicidad de palabras de esta colección de libros de tantas clases queda ahora reducida a lo que es otra multiplicidad, pero menor que la anterior, que consiste en los léxicos y en las palabras que los constituyen. Si dicha persona prosigue ahora su investigación, fácilmente se dará cuenta de que todas estas palabras, de tan variadas clases, están formadas por sólo 24 letras; que ellas difieren entre sí en la manera como están trazadas; que las distintas combinaciones de ellas forman los libros que difieren entre sí todavía más. Ahora bien, si esta persona lleva a cabo otro examen, sin la ayuda del microscopio, no encontrará ningún otro elemento más similar que estas letras, más que las diferentes formas según se dibujan las letras. Pero si recurre al microscopio, pronto se dará cuenta de la manera en que estas letras están formadas por puntos redondos perfectamente homogéneos, y que las letras están dibujadas por la diferente posición y disposición de los puntos.

Esto me parece ser la manera como percibimos la naturaleza. Aquellos libros, tan diferentes en carácter y tan numerosos son cuerpos, y los que pertenecen a distintos reinos están escritos en diferentes lenguas, de los cuales, el análisis químico encuentra una serie de constituyentes fundamentales que son menos distintos entre sí que los libros; estos son las palabras. Estas sustancias constituyentes poseen ciertas diferencias entre sí, y el análisis químico separa de ellos una serie de aceites, tierras y sales de los distintos cuerpos. Finalmente, de la misma manera que los puntos negros forman las letras, así las diversas partículas de los diferentes cuerpos estarán formadas por la diferente disposición de los átomos. La analogía nos

lleva a ver en la Naturaleza no una no-uniformidad, sino más bien la uniformidad de los elementos ².

LA INVENCION DEL EMPAQUETADO DE BOLAS: KEPLER

La parábola de Bruno, ampliada por Boscovich, era consistente con la idea de que los átomos eran todos ellos iguales y sin cualidades, y que las propiedades de los cuerpos físicos dependían solamente de la disposición de los átomos que constituían dichos cuerpos. Si ello era así, la forma de los cristales podría explicarse como una distribución regular de los átomos. Como estos átomos se suponía que eran rígidos y probablemente esféricos, la manera como estas unidades se agregaban constituía un problema meramente geométrico, al suponer que, con toda probabilidad, los átomos esféricos debían ser tangentes entre sí. Si se trataba de un problema meramente geométrico, era lógico que fuera un matemático quien inventase, o descubriera si se quiere, el empaquetado de bolas. Johan Kepler fue este matemático, y el resultado de su investigación se contiene en el trabajo que publicara en 1611 sobre los cristales de nieve.

Pero, ¿por qué Kepler estaba interesado en el problema? El gran astrónomo era, a pesar de sus ideas copernicanas, un neo-platónico y un neo-aristotélico, que creía en los cuatro elementos y otras muchas cosas propias de dicha filosofía. ¿Cómo puede ser, se preguntaba Kepler, que la nieve, que era agua helada, fuera hexagonal, cuando cualquier platónico sabe que el ideal de la perfección estaba representado por los cuerpos platónicos, o los poliedros regulares, cuya simetría era siempre cúbica? ¿Cómo es que el agua, uno de los elementos, elige ser hexagonal en vez de cúbico? Aunque estas preguntas nos parezcan hoy en día peregrinas, no sólo eran importantes para la mente de un Kepler, sino que le ayudaron a llevar a cabo un descubrimiento de la mayor importancia. El desarrollo lógico de Kepler nos indica una vez más los caminos

² Roger Joseph Boscovich, *A theory of Natural Philosophy*, The M.I.T. Press, Cambridge, Mass., 1966, p. 48.

tortuosos por los que avanza, en general, la ciencia, y que es más importante la intuición que la lógica empleada por el investigador.

Como este es el primer momento en que se descubre el empaquetado de bolas, vamos a reproducir aquí lo que Kepler dijo:

Cuando se tracen esferas iguales sobre un plano, de tal manera que eventualmente estén en contacto, estas esferas se disponen ya sea formando triángulos o cuadrados. En el primer caso hay seis alrededor de cada una; en el segundo, cuatro. En ambos casos, el tipo de contactos es el mismo para todas las esferas, excepto las externas. El pentágono no puede producir regularidad, el hexágono puede descomponerse en triángulos; por lo tanto, sólo tenemos dos tipos de ordenación.

Hasta aquí Kepler no ha hecho más que describir, utilizando esferas en vez de polígonos, lo que Oresmes ya había indicado siglos atrás. Pero Kepler no se para en la operación de llenar un plano, sino que intenta ver qué pasa cuando con este esquema plano trata de llenar el espacio.

Cuando ahora procedemos, dice Kepler, en la construcción del cuerpo más compacto posible, se pone capa sobre capa de la distribución plana de esferas, es decir, del tipo A o del tipo B. Cuando empleamos el tipo cuadrado, esto puede llevarse a cabo, ya sea poniendo las nuevas esferas de la fila superior sobre las del piso inferior, o las esferas de la capa superior en el punto medio entre cuatro de la capa inferior. De esta manera, en el primer tipo, cada esfera toca a otras cuatro en su propio plano, más una arriba y otra debajo de él. Y por tanto, está unida a seis esferas. Esta es una distribución cúbica, y de este conjunto pueden separarse cubos. Sin embargo, esta no es la distribución de esferas más densa. En el segundo tipo, cada esfera individual toca otras cuatro en su plano, otras cuatro del piso inmediato inferior y cuatro de arriba. Por tanto; toca un total de doce esferas. Aplicando presión se pueden producir cuerpos rómbicos ³ de este empaquetado de esferas. Esta distribución es muy similar al octaedro y la pirámide. La aglomeración es la más densa: pues no hay otra manera de aceptar más bolas en el mismo volumen.

³ El «cuerpo rómbico» era el rombododecaedro que Kepler había descubierto y que describió en este mismo trabajo.

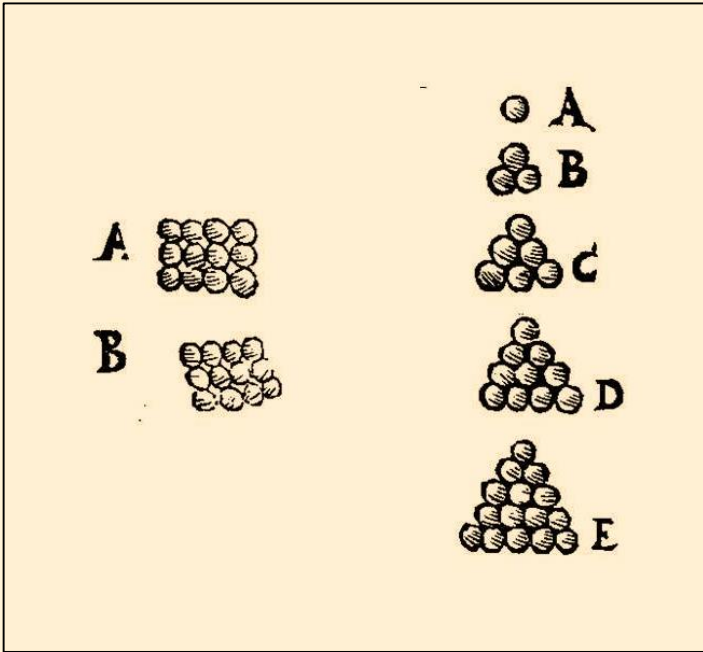


FIG. 9.- Pisos sucesivos de un empaquetado de bolas, según Kepler.

En este momento, Kepler ha descubierto el empaquetado cúbico de bolas, que, en efecto, es denso. Ahora Kepler prosigue con el tipo hexagonal o triangular, que, a fin de cuentas, son idénticos:

Cuando se empieza con un plano con orden triangular, se deducen otras distribuciones espaciales, ya sea colocando las esferas individuales de la fila superior sobre la inferior, o bien las superiores asentadas entre las de abajo. En el primer caso cada esfera toca a seis vecinos en el mismo plano, más una arriba y otra abajo, y por tanto, está unida a otras ocho esferas. La distribución es semejante a un prisma, y por compresión de la esfera da lugar a columnas con seis lados y dos bases hexagonales. A partir del segundo tipo se obtiene lo mismo que en el caso segundo de una

distribución cuadrada. Tomemos (A) un grupo de tres esferas. Pongamos una (A) como vértice. (C) es otro grupo de seis esferas, otro, (D), con diez esferas, y todavía otro (E) con quince esferas. Superpongamos ahora la unidad menor sobre la inmediata mayor, de tal manera que formemos una pirámide, y como cada vez, la esfera superior está sobre tres inferiores, podemos poner esta figura sobre su lado, de tal manera que ya no tenemos un ápice, sino un lado completo encima, las cuatro esferas de abajo forman un cuadrado, y así tantas veces como se extrae una bola del conjunto. Además, vemos que cada esfera tiene doce a su alrededor, a saber seis en su plano, y tres arriba y otras tres abajo. Por lo tanto, en la distribución más densa de bolas no hay triángulos sin cuadrados y viceversa ⁴.

El descubrimiento de que empaquetando bolas según un ritmo hexagonal también resultaba una distribución cúbica de bolas resolvía la duda de Kepler, pues, en efecto a pesar de que el agua al transformarse en hielo adquiriese una forma hexagonal, no estaba en contradicción con la simetría cúbica del empaquetado denso de bolas. El ritmo cuadrado estaba indisolublemente unido, en su mente, al ritmo senario. Por tanto, la nieve podía aparecer en forma hexagonal aun cuando internamente la estructura fuera cúbica.

Hoy en día sabemos que el modelo de Kepler, aplicado a la estructura de la nieve, era erróneo. Lo cual no implica que su descubrimiento de los empaquetados no tuviese valor.

Kepler, de acuerdo con lo que hemos citado hasta aquí, descubrió, por tanto, la estructura cúbica sencilla, el empaquetado cúbico denso, y el empaquetado hexagonal sencillo. También se dio cuenta de que su empaquetado hexagonal denso era idéntico al cúbico denso. Todo ello es cierto. Pero lo que es interesante es ver que dicho autor no descubriese el empaquetado hexagonal denso, diferente del cúbico. Esta dificultad no fue el resultado de pura casualidad, pues lo propio aconteció a otros hombres de ciencia que trataron el problema, como veremos en otras partes de este libro. El descubrimiento del empaquetado hexagonal denso sólo se produjo más de ciento cincuenta años después, gracias a las ideas de Barlow a finales del siglo XIX. Visto el problema con la perspectiva que hoy tenemos del asunto, parece que la dificultad de Kepler y de los que le

⁴ Johannes Kepleris, *Strena seu de Nive Sexangula*, op. cit., p. 8.

siguieron consistía en que no podían pensar en una secuencia de pisos en la cual no se utilizara una de las posiciones permisibles, tal como acontece en el empaquetado hexagonal denso. Aparentemente era difícil para estos autores concebir una escalera en la cual el sentido de los peldaños se invirtiesen cada vez en el segundo peldaño.

EL ATOMISMO SE EXTIENDE POR DOQUIER

El descubrimiento de Kepler no hubiera sido posible si durante la primera mitad del siglo XVII el atomismo no hubiera logrado aceptación general entre los científicos. La figura científica más importante de esta época fue Galileo Galilei (1564-1642), reconocido como el fundador de la ciencia moderna; pues bien, Galileo fue también un atomista, aunque sus ideas no fueran tan claras en esta materia como hubiéramos deseado. A pesar de todo, el atomismo de Galileo se revela en muchas citas. Así por ejemplo, el esquema atomista queda perfectamente indicado en lo siguiente:

Las sustancias, dice Galileo, se hacen fluidos gracias a reducirse a sus componentes irreductibles e infinitamente pequeños⁵.

o, en otro caso, nos dice que

Las menores partículas en las cuales [los cuerpos] pueden ser divididos, son divisibles⁶.

Para Galileo no existía mejor modelo fuera del atomismo para explicar la dilatación y la contracción de los cuerpos. A este respecto, dicho autor se expresó de la siguiente manera:

La contracción de un infinito número de partes indefinidamente pequeñas sin interpenetración o superposición de partes finitas, y la

⁵ Galileo Galilei, *Dialogues concerning two new sciences*, trad. inglesa por Henry Crew y Alfonso de Salvio, McMillan Co., New York, 1914. Dover Edition, sin fecha, p. 40.

⁶ *Ibid.*, p. 35.

expansión de un número infinito de partes indivisibles por la interposición de vacío indivisible, es, en mi opinión, lo más que se puede decir en cuanto se refiere a la contracción y rarefacción de los cuerpos, a menos que abandonemos la impenetrabilidad de la materia e introduzcamos espacios vacíos de tamaño finito ⁷.

Según Galileo el número de átomos o partículas indivisibles que forman un cuerpo no podía ser infinito, puesto que si así fuera el infinito de un cuerpo grande sería mayor que el infinito de un cuerpo menor, contrariamente a la definición de infinito. Galileo resolvió este dilema diciendo que:

Las partes finitas de un continuo no son ni infinitas ni finitas en número, sino que corresponden a un número dado cualquiera ⁸.

Galileo ni fue el primero ni siquiera el que tuvo las ideas más claras en relación al atomismo; en realidad muchos fueron los responsables de la formulación de una teoría, que se extendía rápidamente. Entre estos autores, el químico alemán Daniel Sennert⁹ (1572-1637) creía ya en 1618 en una teoría corpuscular en la que los átomos tenían ciertas cualidades, y lo mismo creía Jungius, que hemos citado en el capítulo anterior.

Ideas atomistas embebían las teorías del gran filósofo francés René Descartes (1596-1650). Descartes es conocido y famoso por la elaboración del método científico que lleva su nombre, y que descubrió en su obra imperecedera *Discours de la Méthode, pour bien conduire sa raison et chercher la vérité dans les sciences* ¹⁰, publicada en Leyden en 1637. Debido a la importancia que este método ha tenido en el desarrollo de lo que hoy conocemos como método científico, vale la pena, aunque sea brevemente, reproducir aquí los puntos que Descartes consideraba importantes en el mecanismo científico. Así dice:

⁷ *Ibid.*, pp. 51 y 52.

⁸ *Ibid.*, p. 35.

⁹ Daniel Sennert, *Epitome Naturalis Scientiae*, Wittenberg, 1618, citado por J. R. Partington, *A History of Chemistry*, vol. 2 (1961), p. 273.

¹⁰ «Discours de la méthode», en las *Oeuvres de Descartes*, por Charles Adam y Paul Tannery, Librairie Philosophique J. Vrin, Paris, 1956, vol. VI, XII + 725 p.

El primer (principio) consiste en no aceptar nada como seguro, hasta tanto tenemos evidencia completa de serlo... El segundo, dividir cada dificultad que yo examino, en tantas partes como sea necesario, y que sean necesarias para mejor comprenderlas ... El tercero, ordenar mis ideas, empezando por los objetos más sencillos y fáciles de conocer, avanzar poco a poco, como por grados, hasta que el conocimiento sea el más completo... Y finalmente, llevar a cabo comprobaciones tan completas, y revisiones tan generales, que me aseguren que nada ha dejado de ser considerado ¹¹.

A pesar de que Descartes era atomista, sus ideas eran diferentes de las comúnmente aceptadas como pertenecientes al atomismo griego. Era cierto que Descartes creía en la atomización de la materia, tal como se deduce del párrafo siguiente:

Ante todo supongo que el agua, la tierra, el aire y cualquier otro cuerpo que formen nuestro ambiente, están formados por muchas partes de formas y tamaños distintos, que nunca están bien ordenados, ni siquiera bien asociados, sino que dejan entre sí muchos intervalos entre ellos; y que estos intervalos no están vacíos, sino más bien llenos de una materia extraordinariamente sutil, a través de la cual he dicho se propaga la acción de la luz ¹².

Las partículas que Descartes suponía eran algo distintas de las que los atomistas habían sugerido, pues él mismo confiesa que:

No preveo las menores partes de los cuerpos terrestres como si fueran átomos o partículas indivisibles, sino más bien, aun creyéndolas de la misma sustancia, creo que cada una de ellas puede subdividirse en un infinito número de maneras ¹³.

A pesar de las inconsistencias que Descartes muestra en los párrafos citados, está claro que debían existir partículas elementales en una forma u otra, dotadas de movimiento propio. Este movimiento dio origen a su hipótesis de los vórtices, que a pesar de

¹¹ Descartes, *Méthode*, pp. 18 y 19.

¹² Descartes, *Météores*, pp. 233.

¹³ Descartes, *Météores*, pp. 238 y 239.

su complicación, constituía la base de su teoría física. En otro orden de ideas, Descartes supuso que «la luz no es nada más que una especie de movimiento», aunque no especificó qué tipo de movimiento era. También creía que la luz se propagaba instantáneamente, es decir, con velocidad infinita. Con respecto al calor y al frío, Descartes opinaba que eran «el resultado de una agitación más o menos activa de lo normal». Estos puntos de vista tienen interés, puesto que las ideas mecánicas de la naturaleza que Descartes avanzó tuvieron un impacto tremendo en los medios científicos y filosóficos de la Europa del siglo XVII, tanto que podemos decir que la ciencia a mediados de dicho siglo era cartesiana.

Pensando en la influencia que Descartes tuvo en el mundo científico, vale la pena referirse a las ideas de dicho autor referentes a la cristalización. En su obra *Météores* incluyó un capítulo completo referente a la sal. El interés de la sal era grande en aquella época, pues, como veremos, la cristalización estaba asociada en cierta manera a dicho «elemento». Descartes supuso que las partículas de sal eran

de igual tamaño en ambos extremos, y en forma de palitos rectos ¹⁴

Por otra parte, suponía que las partículas de agua eran también como palitos; flexibles como pequeñas anguilas, lo que les proporcionaba movilidad. Las partículas de sal las suponía distribuidas al azar en el agua salada, por ejemplo, en el agua marina. Descartes para explicar que los cristales de sal que se formaban de la cristalización del agua marina tienen

forma cuadrada, semejante al diamante en tabla, excepto que sus caras mayores son huecas ¹⁵,

ideó un mecanismo muy sencillo. Según Descartes, la acción del viento reunía las partículas de sal que se separaban de las partículas de agua entre las cuales nadaban. Primero, las partículas en forma de

¹⁴ Descartes, *Météores*, p. 251.

¹⁵ Descartes, *Météores*, p. 258.

palitos flotaban en la superficie de agua, como en D; estas partículas se apelotonaban por la acción de viento, como en L, o N, y finalmente, como en R, las partículas de sal se amasaban en un grano de forma cuadrada con superficies brillantes. Estas superficies adquirirían su brillo gracias a la acción pulimentadora del viento. Pero veamos cómo nos lo explica Descartes:

Sus superficies, frotándose una contra otra, se pulimentan de manera similar a lo que acontece con dos cuerpos duros, excepto que este pulimento se lleva a cabo más fácilmente y casi instantáneamente, porque sus partes, no hallándose unidas unas a otras, se distribuyen inmediatamente, desde el primer momento, tal como es requerido que así sea ¹⁶,

Fácilmente nos damos cuenta de que las ideas de Descartes eran, en materia de cristales, muy primitivas. No sólo no tenía idea de lo que significa una regularidad interna en el cristal, sino que, lo que es mucho más difícil de entender, ni siquiera la necesitaba. Maravilla que Descartes no tuviera esta necesidad, puesto que él mismo había observado y descrito cristales de nieve con detalle, llegando a decir, por ejemplo, que:

es tan perfectamente tallado en hexágonos, y con seis lados tan rectos, y seis ángulos tan iguales, que el hombre no puede hacer nada igual ¹⁷.

Parece extraño que si era tan perfecto el cristal que había observado ¿cómo podía ser que un hombre de tanta perspicacia en otras cosas, no tuvo ni siquiera la curiosidad de preguntarse cuál podía ser la causa de tal belleza?

¹⁶ Descartes, *Météores*, p. 257.

¹⁷ Descartes, *Météores*, p. 301.

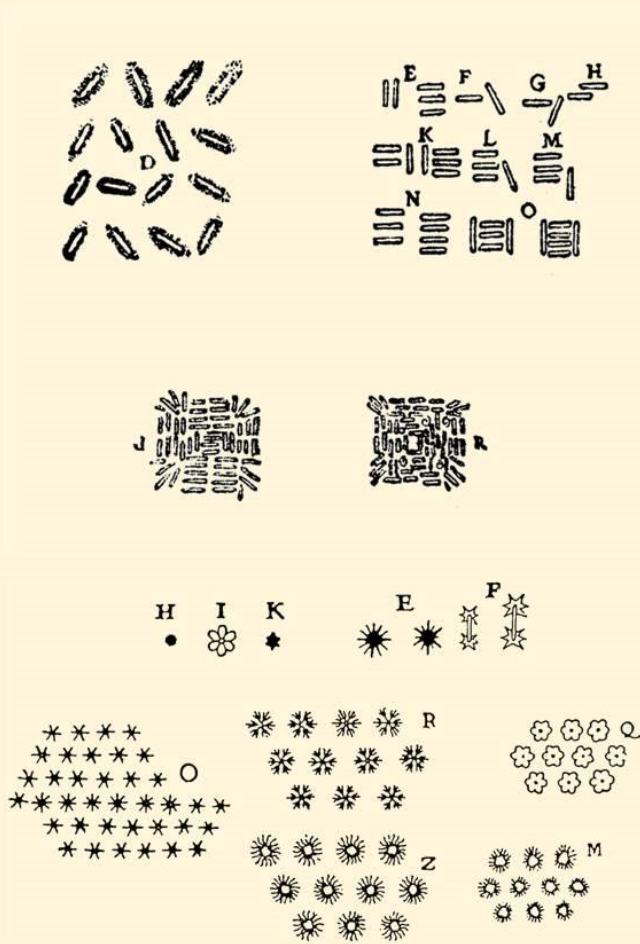


FIG. 10.- *Formación de un cristal de sal y cristales de nieve, según Descartes.*

GASSENDI Y EL ATOMISMO EPICÚREO

Descartes preparó el camino para una concepción mecanista de la naturaleza; pero fue su contemporáneo Pierre Gassendi (1592-1665) quien, en realidad, introdujo en forma más completa y acabada, el atomismo, siguiendo las ideas de Epicuro. Epicuro fue para dicho autor casi como una obsesión. Primero, preparó una biografía¹⁸ del mismo, en la que defendió el nombre del filósofo, desacreditado por sus teorías materialistas y, al parecer, anticristianas. Esta biografía fue seguida por una exposición de las ideas filosóficas de Epicuro, al editar Gassendi el libro X de Diogenes Laertius¹⁹. Después siguieron una serie de cartas al padre Mersenne, influyente personaje científico de París que mantenía una especie de tertulia científica en su celda, de cuya tertulia finalmente surgió la idea de formar L'Academie des Sciences. Aún más tarde, Gassendi divulgó las ideas de Epicuro en una serie de conferencias, finalmente resumiéndolas en su gran obra *Syntagma Philosophicum*²⁰, que publicó en 1649, en la cual llegó al mejor compromiso posible entre una filosofía no cristiana y su probado cristianismo.

Para Gassendi, los átomos eran las últimas partículas de la materia, caracterizadas por su solidez, esto es, por su individualidad y su impenetrabilidad, siendo ésta una mera consecuencia de su solidez. Además de estas dos propiedades fundamentales, los átomos los suponía como dotados de magnitud, forma y peso, pero sin ninguna otra propiedad específica. Gassendi, como es natural, creía que los átomos no eran estáticos, sino que estaban dotados de movimiento, que él explicaba como el resultado del ímpetu de la gravedad. Como consecuencia de ser los átomos cuerpos materiales, eran tangibles y poseían formas diversas, tales como globular o angulosas. Para dicho autor,

¹⁸ Pierre Gassendi, *De vita et moribus Epicuri*, Lyon, 1647, 263 pp.

¹⁹ Pierre Gassendi, *Animadversiones in decimum librum Diogenes Laertiis, Qui est de vita, moribus, placistique Epicuri*, 3 vols. Lyon, 1649.

²⁰ Ver P. Rochot, *Les travaux de Gassendi sur Epicure et sur l'atomisme*, Paris, 1944, 212 pp. Nosotros hemos utilizado para nuestro estudio las obras completas de Gassendi, publicadas en 1730 y que figuran en la Biblioteca de la Universidad de Barcelona. Las referencias que siguen se refieren a esta edición.

los átomos no son puntos matemáticos, sino corpúsculos muy tenues que tienen magnitud y constituyen el material básico de todos los cuerpos que existen en la naturaleza ²¹.

En este sentido los átomos eran descritos como el mínimo físico, es decir, la partícula menor concebible físicamente, de donde derivó la sinonimia de mínimo y átomo. Gassendi no se limitó sencillamente a poner en idioma de su época la obra de Epicuro, sino que, como buen filósofo natural que era, utilizó el conocimiento científico de su tiempo para afianzar su teoría. Es interesante notar, por ejemplo, el empleo del engyscopio (microscopio sencillo) en apoyo de la verosimilitud de la existencia de los átomos. Así dice:

con el engyscopio podemos ver los granos de polvo con caras y ángulos que no podríamos prever mentalmente... También vemos corpúsculos cuyo diámetro es cien veces menor de los que podemos ver a simple vista, y cuerpos formados por miles de partes ²².

El engyscopio no era el único medio que abría al científico «un inmenso», sino que Gassendi busca otros medios para explicar la pequeñez de los átomos. Así, por ejemplo, dice:

Cuanta más agua añadimos a un pequeño grano de pigmento, tanto mayor es el número de páginas que podemos colorear con él; y en cada página, cuán innumerables son los puntos que han sido teñidos y en cada punto se ha depositado una partícula, indicándonos cuán increíble es el número de partículas contenidas en un sólo grano de pigmento ²³.

Siguiendo las ideas de Epicuro, Gassendi mantuvo que los átomos tenían formas distintas, e incluso formas poliédricas. La prueba de que las partículas elementales tenían formas poliédricas la basó Gassendi en los hechos de la cristalización, siguiendo unas ideas semejantes a las que Palissy había seguido un siglo antes (ver capítulo 2). El razonamiento utilizado en este caso era el siguiente:

²¹ Gassendi, *Physica I, Liber III*, p. 234.

²² Gassendi, *Physica I, Liber III*, p. 236.

²³ *Ibid.*, p. 236.

Si el agua salada se deja evaporar por la acción del sol, la sal se agrega en cuerpos cúbicos, el alumbre en cuerpos octaédricos y así sucesivamente. Y estos cubos son mayores cuanto más agua hay disponible, y menores cuando menos solución existe o menos profunda, y finalmente si se hace cristalizar una gota, los cubos son tan pequeños que sólo son visibles con el enguscopio. Lo cual indica que los cubos mayores están formados por otros menores, y que éstos, de manera semejante, por otros todavía menores, formados por triángulos isósceles, que forman las caras del cubo. De lo que se deduce que los últimos átomos o moléculas, las semillas que forman las sales, deben ser con toda probabilidad cuadrados o triángulos isósceles, y si esto se puede deducir también del alumbre, azúcar y otros cuerpos semejantes, ¿no podemos extender esta idea a otros cuerpos que tienen forma geométrica? ²⁴

Pero Gassendi no se paró aquí: como hemos visto, se refirió a que la amatista era hexaédrica o hexagonal, que el diamante era octaédrico, y que la esmeralda era dodecaédrica (doble hexagonal) ²⁵; también sabía que la sal roca era *tessalata* o cúbica, y que podía fragmentarse en cuerpos cúbicos. Por otra parte, también sabía que el yeso, en su variedad espectralis, podía ser dividido en fragmentos rómbicos y romboidales cada vez menores. Este doble hecho, la forma poliédrica de los cristales y la exfoliación, llevaron a Gassendi a decir:

No puedo concebir cómo estas piedras pueden estar formadas por una masa que no sea discreta, y que sus partes y partículas hayan de estar regularmente ordenadas, y que los menores (las partículas deban ordenarse conformando el mayor (cuerpo macroscópico) ²⁶

Ideas muy similares a las que Gassendi presentaba, fueron utilizadas más de un siglo más tarde por Haüy cuando estableció su teoría de los cristales. Lo que nos interesa señalar aquí es que la idea de una estructura discreta y regular en el cristal fue una consecuencia directa del atomismo.

²⁴ Gassendi, *Ibid.*, p. 237.

²⁵ Gassendi, *De lapidibus, ac metallis*, cap. II. *De gemmis*, p. 101.

²⁶ Gassendi, *Ibid.*, p. 99.

La teoría atomista de Gassendi hubiera quedado incompleta si no hubiera tratado el movimiento propio de los átomos. Si los átomos poseen movimiento, ¿cómo podía ser que los sólidos existan? Gassendi comprendió inmediatamente esta dificultad, que explicó en términos muy semejantes a los que hoy en día aceptamos. Así, dice:

Podemos decir que el movimiento de los átomos es interno, incluso cuando los sentidos no pueden percibirlo... (en un sólido) los átomos están en movimiento perpetuo confinados por sus vecinos, como si no estuvieran haciendo nada ²⁷.

Tal es el concepto que tenemos hoy en día, cuando concebimos los átomos en posiciones de equilibrio que resultan de la interacción de los átomos vecinos.

Gassendi, como buen campeón del atomismo, consideraba casi todo corpuscular. Así, la luz era corpuscular, o como él mismo decía, *átomos de luz solar*, también el calor y el frío estaban formados por *corpúsculos ignis* y *atomi frigorificae* respectivamente. Consecuente con sus ideas, incluso quiso explicar el magnetismo como la consecuencia de una serie de átomos en forma de garfios que se extendían entre los cuerpos en atracción.

La obra de Gassendi, aunque con numerosos defectos, contribuyó en su época a que se aceptara la teoría atomista de la materia. Pero fue el experimento de Torricelli en 1644, que mostró que se podía obtener el vacío, la prueba experimental que la teoría necesitaba. Con Gassendi y Torricelli el triunfo del atomismo estaba asegurado.

²⁷ Gassendi, *Physica*, vol. III, p. 242.

EL ATOMISMO EN INGLATERRA: CHARLETON Y BOYLE

Las ideas atomísticas, que en el continente encontraron su máximo portavoz en Gassendi, también eran cultivadas, aun con mayor éxito, en Inglaterra. En realidad, el inicio de la teoría se puede datar en los tiempos de la reina Isabel, como hemos visto en las opiniones de Gilbert. Alrededor de 1640 el grupo más importante de atomistas era el Círculo de Newcastle, que debido a una serie de circunstancias políticas, iba a jugar un papel importante en la introducción definitiva del atomismo en Inglaterra. Políticamente, el grupo era realista, y como tal, durante la revolución de Cromwell, optó por la emigración, trasladándose a París alrededor de 1640. Pronto el grupo se asoció con atomistas tales como Gassendi, y en especial con el Padre Mersenne y René Descartes. Como los miembros del grupo de Newcastle eran atomistas incipientes, fue natural que inmediatamente se convirtieran a la teoría mecanicista de Descartes y al atomismo epicúreo de Gassendi. Terminado el gobierno de Cromwell, el grupo decidió regresar a Inglaterra con la Restauración, transformándose lógicamente en el vivero del cual las ideas atomistas se divulgaron entre el medio científico inglés de la época.

Fue debido a la influencia directa de este grupo que Walter Charleton (1620-1707), otro realista, no sólo se convirtiera a la nueva filosofía, sino que llegara a ser uno de los propagandistas más eficaces de las nuevas ideas. Su obra más importante para nosotros fue *Physiologia Epicuro-Gassendo-Charltoniana* ²⁸, que publicara en 1654. La obra estaba basada casi completamente en el tratado de Gassendi; gracias a ella, entró en la mentalidad científica inglesa el atomismo, y en especial el concepto de los cristales formados por agregación de átomos y moléculas poliédricas.

Estas ideas atomísticas fueron perfeccionadas pocos años después por Robert Boyle (1627-1691), considerado por muchos como el fundador de la química atomística. A pesar de su importancia

²⁸ Walter Charleton, *Physiologia Epicuro-Gassendo-Charltoniana: or a fabric of science natural, upon the hypotesis of atoms, founded by Epicurus, repaired by Petrus Gassendus. augmented by W.Charleton*, London, 1654. Reprinted by Robert Hugh Kargon. The Sources of Science, núm. 31. Johnson Reprint Co., New York, 1966, XXV +491 pp.

no parece oportuno en este libro tratar de este aspecto de la obra de Boyle, pues en realidad este punto pertenece a la historia de la química, quedando por tanto al margen de nuestro trabajo. Lo que sí nos interesa es la idea de Boyle según la cual un sólido era el resultado de la aposición y yuxtaposición de corpúsculos de naturaleza distinta. A parte de lo que ya hemos dicho (Ver Capítulo 2), en general, la contribución de Boyle a nuestra ciencia es de poca importancia. Con todo vale la pena traer aquí ciertos puntos que son de interés.

La obra que ha hecho a Boyle célebre es *The Sceptical Chymist* ²⁹ publicada en 1661. En esta obra Boyle introdujo por vez primera la palabra cristal, con el sentido general que hoy en día tiene. Así, dice:

Para la sal volátil [= carbonato amónico] he observado que se adhiere al recipiente en forma de paralelepípedos; y de la sal volátil de la sangre humana puedo mostrar muchos granos con la figura que los geométricos llaman rombos; aunque yo no me atrevo a afirmar que estos u otros cristales (si puedo llamarlos así) salinos tengan siempre la misma forma.

Esta cita, por otra parte, indica claramente que Boyle no creía en la constancia de la forma cristalina, o al menos tenía serias dudas en este punto. A pesar de todo, en otra parte dice que

la forma de los distintos cuerpos debe ser el resultado de tamaño, forma, movimiento y conexión específicos de los corpúsculos que lo componen, y de sus efectos mecánicos,

es decir, que la morfología de los cristales es una consecuencia de las propiedades específicas de los átomos que los forman y la manera de unirse. Esta idea, que deriva directamente del postulado atómico, es la misma que tenemos hoy en día de la estructura de los cristales.

²⁹ Robert Boyle, *The sceptical Chymist, or chymico-physical doubts and paradoxes*, London, F. Cadwell, 1661. Facsímil, por Dawson of Pall Mall, London, 1965, 442 pp.+ Prefacio.

EL SEGUNDO DESCUBRIMIENTO DEL EMPAQUETADO DE BOLAS

Como hemos indicado, Robert Hooke (1635-1703) fue uno de los ayudantes que Robert Boyle tenía en Oxford. De esta asociación entre Hooke y Boyle derivó el interés del primero hacia la química y hacia los problemas químicos. Como las ideas químicas de Boyle estaban basadas en el atomismo, estas ideas constituyeron también la base del pensamiento científico de Hooke, tal como se revela en su obra *Micrographia*. Para la ciencia de los cristales, esta actitud científica de Hooke tuvo la mayor importancia, puesto que llevaron a que dicho autor redescubriera, al parecer con independencia, el empaquetado de bolas y basado en dicho descubrimiento, pudo trazar un simple esquema que explicara la morfología de los cristales.

Según Hooke,

Todas las figuras regulares que conspicuamente nos parecen variadas y curiosas, y que adornan y embellecen tal multitud de cuerpos, derivan sólo de dos o tres posiciones o posturas distintas de partículas globulares ³⁰.

La prueba de esta afirmación, la encontró Hooke llevando a cabo un experimento con perdigones de plomo, material que no sólo era fácil de obtener, sino que gozaba de ciertas propiedades experimentales adecuadas al caso: eran esféricos, tenían el mismo tamaño, aproximadamente, y eran pesadas e indeformables. Parecían hechas a medida para representar lo que se creía un átomo debía ser: tan sólo era necesario agrupar estos perdigones y observar la disposición que elegían libremente. Y así lo hizo Hooke:

Y así veremos -nos dice- que si dejamos rodar las bolas globulares sobre un plano inclinado, se agrupan naturalmente en un orden triangular, dando origen a toda una variedad de figuras que pueda imaginarse hechas todas de triángulos equiláteros; y se encontrarán, por casualidad, todas las superficies de que el alumbre está formado ³¹.

³⁰ Robert Hooke, *Micrographia*, p. 85.

³¹ *Ibid.*, p. 86.

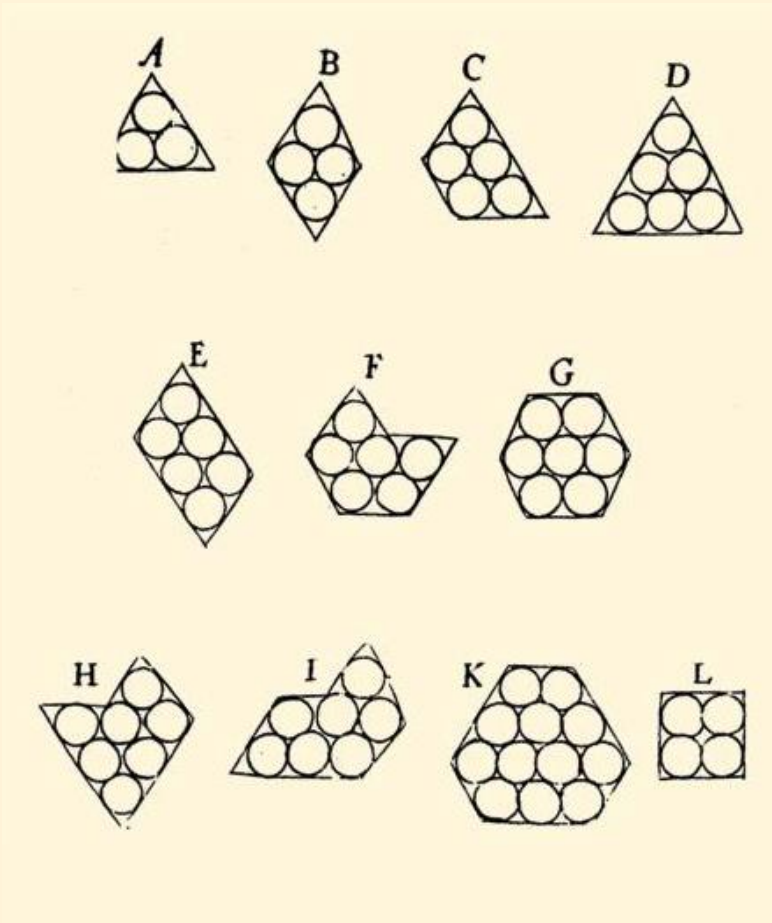


FIG. 11.- *Empaquetado de bolas como explicación de la morfología del cristal, según Hooke.*

Según Hooke no sólo podían obtenerse triángulos, hexágonos y rombos, sino que cualquier figura dependiendo tan sólo del número de bolas empleadas y de su disposición mutua. Pero las bolas no se disponen *a priori* en sólo un plano:

no sólo esta disposición se mantiene sólo en superficies, sino también en solidez (en volumen), pues es obvio que un cuarto glóbulo colocado sobre el tercero en esta textura, forma un tetraedro regular, que es forma muy corriente del cristal de alumbre, y no hay figura en la cual el alumbre se encuentra cristalizado, que no pueda ser iniciada por esta textura de glóbulos, y no por otras ³².

Jugando con bolas esféricas, no podía dejar de descubrir, también, que se podían formar cuadrados con cuatro bolas convenientemente dispuestas. Y, de acuerdo con su forma de pensar, inmediatamente asoció este tipo de apilamientos a la morfología de cristales cúbicos. Y así dice:

la sal marina, y la sal gema, que está compuesta por una textura de glóbulos distribuidos en forma cúbica, como en L, y que todas las figuras de estas sales pueden originarse por esta textura de glóbulos, y no por otra. Y que las formas de vitriolo y de sal de piedra, así como el de cristal (cuarzo), hielo, etc., están formadas por estas dos texturas, pero moduladas por ciertas propiedades ³³.

El modelo que Hooke desarrolló, así como su teoría, constituye el primer intento de explicar la morfología cristalina a partir del apilamiento monótono de átomos. El modelo era, con todo, primitivo, pues estaba basado en la creencia de que todos los átomos eran iguales en propiedades y tamaño, y que su forma era la esférica. Este siglo nos ha demostrado que la hipótesis no era adecuada. Pero la grandeza de Hooke reside precisamente en haber intuido que la única manera de interpretar la morfología del cristal era a través del conocimiento de su estructura atómica.

³² *Micrographia*, p. 85.

³³ *Micrographia*, p. 86.

EL PRIMER PROGRAMA PARA EL ESTUDIO DE LOS CRISTALES

Tanto le llegó a interesar el problema de los cristales, que Hooke se trazó el siguiente programa para su investigación:

Primero, formar una colección tan exacta y completa como sea posible de todos los diversos tipos de cuerpos figurados geométricos, así como tres o cuatro cuerpos de cada tipo.

Segundo, con ellos obtener una historia tan exacta como sea posible de los lugares de generación o de hallazgo, y buscar cuantas más circunstancias se puedan que tiendan a ilustrar este punto, como se puede observar.

Tercero, llevar a cabo tantos ensayos como se pueda, en relación a la disolución y coagulación de diversas sales que cristalizan, para la necesaria instrucción e información de esta cuestión.

Cuarto, hacer diversas pruebas con diversos cuerpos, tales como metales, minerales y piedras, disolviéndolos en diversos menstruos, y cristalizándolos para ver las diversas figuras que resultan de estos diversos compuestos.

Quinto, formar composiciones y coagulaciones diversas de sales juntas en la misma masa para observar qué figura se logrará del producto de ellas; y en todo caso, anotar tantas circunstancias como juzgue lleven a mi investigación.

Sexto, investigar la compactación o rareza de la textura de estos cuerpos, examinando su gravedad, su refracción, etc.

Séptimo, inquirir especialmente qué operaciones el fuego produce en las diversas clases de sales, qué cambios produce en sus figuras, texturas o energías.

Octavo, examinar su manera de disolverse, o cómo actúan sobre estos cuerpos los que los disuelven, la textura de estos cuerpos antes y después del proceso. Y esto por la historia.

Finalmente, para la solución, examinar por qué y de qué varias maneras, tal y tal figura, acción y efectos pueden ser producidos ³⁴.

Tal era el programa que Hooke se había propuesto para resolver los problemas de los cuerpos cristalizados. El programa era, en realidad, demasiado ambicioso para acometerlo solo, y se quedó solamente en un buen ejercicio mental. Robert Hooke tuvo el coraje

³⁴ *Micrographia*, pp. 86 y 87.

de trazar un plan que los cristalógrafos han adoptado inconscientemente en todos y cada uno de los detalles que Hooke propusiera. Su realización ha necesitado muchas generaciones de científicos y la dedicación de miles de investigadores; ¡y todavía el misterio de los cristales no ha sido resuelto en su totalidad! Con una visión profética Hooke decía que:

conociendo cuál es la forma de los cuerpos inanimados o universales, podremos con más juicio avanzar en el paso siguiente de la investigación de la forma de los cuerpos vegetativos; y finalmente, los animados, que me parecen constituir el paso más elevado del conocimiento natural de que es capaz la mente humana ³⁵.

El desarrollo de la cristalografía, que después de entender la estructura de los cristales entra ahora en la estructura de lo vivo, ha dado la razón a un visionario del siglo XVII.

³⁵ *Ibid.*, pp. 87 y 88.

4. LAS PROPIEDADES FÍSICAS DE LOS CRISTALES SON DIFERENTES

ERASMO BARTHOLINO Y LA DOBLE REFRACCIÓN

Muy apreciado por todos es el diamante, y muchas son las satisfacciones que proporcionan otros tesoros similares, tales como las piedras preciosas y perlas, aunque sirven sólo para embellecer y adornar dedos y cuellos; pero por otra parte, aquel que prefiere saber fenómenos extraordinarios experimentará si duda gran satisfacción, al menos así lo espero, observando un nuevo tipo de cuerpos, a saber, un cristal transparente, recientemente llegado de Islandia, que quizás sea la mayor maravilla que la Naturaleza haya jamás producido.

Con estas palabras iniciaba su trabajo un notable profesor de matemáticas y medicina de la Universidad de Copenhague, que había descubierto dos hechos fundamentales en la física de los cristales. El profesor era Erasmus Bartholinus (1625-1698), hermano de Thomas Bartholinus, el preceptor y amigo de Stensen. Erasmo Bartholinus tenía razones suficientes para considerar el espato de Islandia una de las maravillas de la naturaleza, pues lo que él acababa de descubrir era maravilloso e inexplicable. Pero veamos la historia de sus descubrimientos.

El espato de Islandia, una variedad de calcita cuyas propiedades físicas especiales, tales como presentarse bien cristalizado, ser incoloro y transparente como el agua, atrajo bien pronto la atención

de los coleccionistas desde el momento de su hallazgo alrededor de 1630 *en la profundidad de una alta montaña, no lejos de la Bahía de Roerfiord*. Erasmo tenía en su casa una serie de esos bellos cristales que sin duda constituían para él un orgullo bien merecido.

Erasmo estudiaba estos cristales con sumo cuidado, no sólo midiendo sus ángulos, sino dándose cuenta de que todos ellos tenían la misma forma exterior romboédrica.

Un día, casi accidentalmente, Bartholino¹ hizo el descubrimiento que le iba a hacer famoso: al colocar uno de estos hermosos cristales sobre una página que acababa de escribir observó que las palabras y líneas que había trazado en él se veían dobles a través del cristal. Maravillado por lo que veía, el danés se preguntaba, ¿qué está sucediendo? ¿por qué todas las líneas son dobles? Lo que sucedía es que Bartholino había observado por vez primera la doble refracción de la luz, producida por un cristal. Podemos, sin gran esfuerzo, darnos cuenta de la sorpresa de este hombre de ciencia. Ante todo se aseguró que lo que estaba observando no era producto de la casualidad. Bartholino probó y comprobó una y otra vez que lo que estaba viendo era real. Ahora estaba ya seguro; cada vez que ponía un cristal encima de una hoja de papel escrita, la escritura aparecía doble. No había duda, el hecho era cierto. Para asegurarse totalmente probó ahora con otros ejemplares de su preciada colección, y en cada caso, las líneas aparecían dobles. Finalmente quiso comprobar el hecho con el cristal que era causa de orgullo, el más bonito y diáfano de todos. Sus manos temblaban con la emoción del momento... pero su emoción se transformó pronto en pesar, pues un traspies le hizo perder el cristal que cayendo al duro suelo se rompió en múltiples pedazos. ¡El cristal más valioso estaba perdido! Pero esta catástrofe era en realidad una fortuna en un día pleno de descubrimientos; con reverencia Bartholino recogió los pedazos de cristal que tan tontamente había destrozado, y pronto se dio cuenta de que aquellos pedazos lejos de ser de forma arbitraria, todos ellos se habían truncado según caras planas que preservaban la morfología

¹ Erasmus Bartholinus, *Experimenta crystalli islandici disdiacastici, quibus mira et insolita refractio detegitur*, Hafnie D. Paulli, 1670, 60 pp.

romboédrica en cada trozo. Afanosamente trazó sobre una nueva hoja de papel el contorno de dichas caras, y pronto comprendió que los ángulos eran constantes. El cristal se rompía según direcciones determinadas, no según otras. Erasmo había descubierto el fenómeno de la exfoliación, es decir, la propiedad de los cristales a partirse regularmente según planos.

Erasmo Bartholino publicó sus descubrimientos en un libro de sesenta páginas titulado *Experimenta crystalli islandici disdiaclastici*, que apareció en 1670, un año después que Stensen publicara su *Prodromus*. Inmediatamente después de haber publicado el libro, el propio Bartholinus comunicó sus descubrimientos a la Royal Society, en cuyos Philosophical Transactions ² apareció el año siguiente un largo resumen de la obra. El descubrimiento de la doble refracción tiene tal importancia en la física cristalina que vale la pena referirse con cierto detalle a la propia experiencia de Erasmo Bartholinus.

Este descubrimiento y su exfoliación me absorbieron de tal manera por cierto tiempo, que abandoné otras cosas -nos dice Bartholinus-. Me di cuenta que había encontrado gracias a esta observación un problema fundamental de la refracción. Un examen superficial puede, con todo, hacer que el fenómeno pase desapercibido. Sin embargo, puede fácilmente mostrarse de la siguiente manera: marca sobre la mesa o un papel claro un objeto, por ejemplo, un punto o algo similar, como B o A. Pongan sobre él la superficie inferior LMNO de un romboide. Miren, entonces, a través de la superficie superior RSPQ el objeto A o B a través de toda la masa del prisma RSPQOLMN, primero sobre B y después sobre A. Si miramos a través de otros cuerpos, como vidrio o agua, la imagen del objeto aparece sencilla, pero en este caso, cada objeto se ve doble en la superficie RSPQ, es decir, B en G y H, y A en CE y FE, como indica la figura ³.

Bartholinus llevó a cabo cuidadosos experimentos, que le sirvieron para descubrir la fenomenología de la doble refracción. Así, dice:

² *An account of soundry experiments made and communicated by that learned mathematician, Dr. Erasmus Bartholinus, upon a crystallike body, sent to him out of Island*, Phil. Transaction, London, vol. 5 (1670), 2039-2048.

³ Erasmus Bartholinus, *Experimenta*, pp. 11 a 13.

Los objetos vistos a través aparecen ciertas veces, y en ciertas posiciones del prisma, de tal manera que en piezas delgadas la distinción de la imagen doble es casi imperceptible ⁴.

En otro párrafo indica que:

A un observador cuidadoso, una de las imágenes le aparecerá más alta que la otra; en ciertas posiciones las imágenes de un objeto aparecen sencillas, como a través de cualquier otro objeto transparente; si cualquiera de los ángulos obtusos de este prisma se divide en dos partes iguales por una línea, y los rayos visuales pasan de los ojos al objeto a través de dicha línea, o su paralela, ambas imágenes se encontrarán en dicha línea, o en otra paralela a la misma. He observado que una de las imágenes es movable, mientras que la otra permanece fija ⁵.

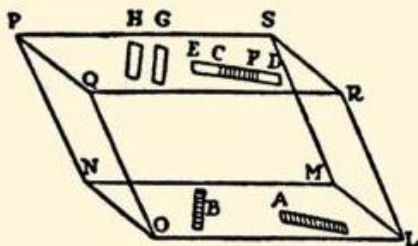


FIG. 12.- *La doble refracción de la calcita, según Bartholinus*

⁴ *An account*, p. 2042.

⁵ *An account*, p. 2043.

Para Bartholinus era claro desde el primer momento que se encontraba ante un hecho nuevo imposible de explicar de acuerdo con la teoría corriente de la refracción de la luz. Se sabía, por ejemplo, que la luz es refractada cuando pasa de un medio a otro, refracción que depende del ángulo de incidencia y de la refracción del medio. La refracción podía medirse por los ángulos formados por el rayo incidente y el rayo refractado con la perpendicular a la superficie de separación de los dos medios. No hacía mucho (en 1621), que el holandés Willebord (1591-1626) había descubierto la ley que relacionaba ambos ángulos (de incidencia y de refracción) con longitudes que podían ser descritas como la razón de las cosecantes de dichos ángulos. Esta ley fue descubierta independientemente por René Descartes algún tiempo después, que en su *Dioptrica* del 1637 la expresó en función de los senos de los ángulos, relación que se aceptó en el mundo científico como ley de Descartes. Se sabía también que un rayo incidente daba origen a un solo rayo refractado, cuya dirección respondía a la ley de Descartes. También se sabía que un rayo perpendicular a la superficie de separación de los dos medios no se refracta. El descubrimiento de Bartholinus mostraba, por el contrario, que un solo rayo incidente se desdoblaba en dos, según ángulos distintos; que incluso en incidencia normal se producía doble refracción, y que uno de los rayos producido era todavía más imprevisible que el otro, que seguía las reglas aceptadas de la refracción.

Todo ello lo analizó Bartholinus, e incluso consideró la posibilidad de que el nuevo fenómeno no se debiera a una refracción asociada a una reflexión. Erasmo concluyó que

Así como se sabe que ninguna imagen puede atravesar dos cuerpos diáfanos de distinta naturaleza más que por refracción, y que una imagen supone una refracción, así se deduce que si la refracción es la causa de este fenómeno, entonces debe haber una doble refracción para que existan dos imágenes. Y como ambas imágenes en nuestro cristal de Islandia no son de la misma clase, sino que una es fija, mientras que la otra se mueve, así también distinguiremos las refracciones entre ellas, que refractan los dobles rayos que llegan a los ojos, y llamaremos a una de ellas, la que envía una imagen refractada fija, *usual*; la otra, que transmite la móvil al ojo, *inusitada*. Y por ello, debido a esta propiedad peculiar y tan notable de la doble

refracción de la piedra de Islandia, no tenemos escrúpulos en denominarlo *disdiaclastico* ⁶.

La palabra disdiaclastico es el vocablo latino equivalente a birrefringente; las palabras *usual* e *inusitada* pueden también traducirse como ordinaria y extraordinaria, tal como hoy en día se dice. Los términos *usual* e *inusitada* fueron conservados por Newton, y con él gozaron de cierta popularidad, especialmente en el siglo XVIII.

Bartholinus no se contentó con descubrir el nuevo fenómeno, sino que intentó explicarlo. Como era de esperar, Erasmo intentó una explicación de acuerdo con las ideas que en aquel entonces se tenían sobre transparencia. Esta propiedad se explicaba por la creencia de que existían poros en el cuerpo transparente, a través de los cuales se propagaba la luz, ya se supusiera corpuscular o como un movimiento vibratorio (concebido como comprensiones y dilataciones). Esta teoría era aceptada por ejemplo por Descartes, Gassendi y en general por los científicos de la época. No nos puede extrañar que Bartholinus basara su explicación en una modificación de esta teoría. Así, dice,

Este cuerpo birrefringente tiene sus poros a lo largo de la arista de los lados, y paralelos entre sí; puesto que puede observarse que de acuerdo con esta posición de los lados se rompe, y sus partes se separan una de otra; y que una de las imágenes, a saber, la movable, pasa a través de ellos. Junto a estos poros, y paralelos a los lados, tiene otros poros, como el vidrio, agua y cristal verdadero (cuarzo), a través de los cuales la imagen fija se transmite⁷.

La hipótesis de dos tipos de poros podía explicar la existencia de dos rayos, pero no podía explicar el movimiento del rayo extraordinario al girar el cristal. Para explicar esto y otras peculiaridades del fenómeno, se necesitaba una teoría mejor que la que Bartholinus proponía. Unos años más tarde Huygens, como veremos, presentó una teoría más de acuerdo con la realidad, pero no

⁶ *An account*, p. 2044.

⁷ *An account*, p. 2045.

fue hasta el siglo XIX cuando la doble refracción se interpretó correctamente, gracias a los trabajos de Fresnel.

El descubrimiento de la exfoliación tenía también su importancia científica, pero Bartholinus no debió percibir la implicación que su descubrimiento tenía. Se contentó con describir a lo largo de qué plano se producía la exfoliación, e indicó como de pasada que el cristal debía estar formado como de unidades de la forma sugerida por la exfoliación. Pero, aun en este caso, no parecía estar demasiado convencido.

La figura de este cristal es como una figura rómbica o romboide. No sólo el cristal total tiene esta forma, sino también todas las partes de él, cuando se rompe en pequeños pedazos, mantienen esta forma; excepto que en ciertos casos el polvo, cuando se extrae, produce formas piramidales triangulares ⁸.

Así como al hablar de poros no hacía otra cosa sino expresar las ideas de la época, la referencia a formas piramidales no era más que traer a colación la idea de que las últimas partículas de sal, que se suponían eran las responsables de la cristalización, tenían forma piramidal.

El fenómeno de la exfoliación no era realmente nuevo, pues como hemos visto en otras partes de este libro, se conocían algunos ejemplos como el yeso y la mica. Pero este fenómeno se había tomado como una cosa natural, y poco preocupaba su existencia. Por el contrario, la exfoliación del espato de Islandia era inesperada, y fue precisamente por esto que su existencia motivó como veremos, a diversos investigadores.

La importancia de la exfoliación deriva de tres hechos: la exfoliación ocurre sólo según superficies definidas del cristal y no en cualquier dirección. Esto significa que el cristal, al menos el espato de Islandia, no es isótropo como un vidrio sino que es anisótropo, es decir, que la propiedad física, en este caso de rotura, tiene valor distinto según distintas direcciones. Por otra parte, la exfoliación del espato de Islandia indicaba que el cristal no es un cuerpo continuo, sino que deben existir ciertas discontinuidades en su estructura que

⁸ *An account*, p. 2041.

permitan la fractura según ciertas direcciones. Finalmente, la existencia de tres exfoliaciones idénticas y simétricas en el espato de Islandia dan lugar a fragmentos con una morfología única: cuerpos romboédricos limitados por caras que forman entre sí ángulos idénticos. Además, la forma del fragmento es independiente de su tamaño y de la forma del cristal original. Estas ideas sirvieron para desarrollar una teoría de la estructura cristalina basada en la agregación paralela de romboedros idénticos. La extrapolación y generalización de los hechos asociados a la exfoliación del espato de Islandia no fueron realizados por Bartholinus. Pasó en realidad más de un siglo hasta que Torbern Bergman y, especialmente, René-Just Haüy, repitiendo el desgraciado incidente de romper un cristal de calcita, fueron capaces de interpretar los hechos de tal manera que dieran lugar a una teoría general de cristal.

HUYGENS Y LA INTERPRETACIÓN DE LA DOBLE REFRACCIÓN

La interpretación que Bartholinus dio de la doble refracción era más bien la aplicación de la teoría aceptada en su época, y no una interpretación nueva. La interpretación nueva apareció en 1690 en el libro *Traité de la lumière*⁹ de Christian Huygens, libro que contenía un capítulo dedicado a la «extraña refracción del cristal de Islandia». Huygens llegó a esta interpretación después de un profundo estudio del fenómeno, estudio que le llevó una serie de años, no decidiéndose a publicar los resultados de su propia investigación hasta estar bien seguro de lo que estaba observando y de su posible explicación. El mismo Huygens nos la explica:

El primer conocimiento que el público tiene de la doble refracción se debe al señor Erasmo Bartholinus, quien dio la descripción del cristal de Islandia, así como de su fenómeno más importante. Pero no voy a dejar de dar mi investigación aquí, no sólo para provecho de los que no han podido ver su libro, sino también porque existen pequeñas diferencias en ciertos fenómenos, tal como se deducen al comparar mis observaciones y las de

⁹ C. H. D. Z., *Traité de la Lumière*, Pierre van del Aa, Leiden, 1690, pp. 452-546 de Obras Completas.

aquel autor: pues he tenido especial cuidado en examinar esta propiedad de la refracción, con el fin de estar totalmente seguro de ella, antes de entrar en la investigación de las causas ¹⁰.

Christian Huygens (1629-1695) fue el segundo hijo de Constantino Huygens (1596-1687) y de Susana van Bearle, mujer culta e inteligente, hija de un rico mercader de Amsterdam, tío de Constantino. El padre de Huygens fue un diplomático muy brillante y de una extraordinaria habilidad. Fue esta atmósfera de cultura e internacionalismo uno de los factores decisivos en la vida de Christian, pues Descartes era amigo de la familia y había pasado temporadas en casa de Constantino. A temprana edad Christian leyó ávidamente la obra de Descartes, *Principiae Philosophiae*, transformándose, como era previsible, en un cartesiano. Christian entró en la Universidad de Leyden a los dieciséis años, pero pronto emprendió una serie de viajes por Dinamarca, Frisia e Italia que le sirvieron para completar su educación. Por aquel tiempo, el joven Christian mantenía correspondencia regular con el Padre Mersenne de París, que como hemos visto mantenía una especie de club científico frecuentado, entre otros, por Descartes, Gassendi, Fermat y Pascal.

No vamos a dar aquí cuenta detallada de los trabajos del excepcional hombre de ciencia que fue Christian Huygens ¹¹. Lo que sí nos interesa es señalar que en 1665 visitó París donde conoció a Gassendi en sus últimos meses de existencia, entrando en contacto con la llamada Academia Montmoriana. Esta visita y contactos fueron renovados en 1660, llegando a transformarse en permanentes a partir de 1666. Siguiendo la invitación de Colbert, el ministro de Luis XIV, Huygens se trasladó a París para dirigir la nueva *Academie de Sciences* que el rey acababa de fundar. Los años siguientes marcaron una inusitada actividad científica por parte de Huygens, actividad acompañada de poca salud, lo que motivaba, de tiempo en tiempo, temporadas en Holanda su tierra natal. Su delicado estado de

¹⁰ *Ibid.*, p. 49.

¹¹ Para más detalles, ver A. E. Bell, *Christian Huygens and the development of science in the seventeenth century*, Eduard Arnold and Co. London, 1950, 220 pp., especialmente pp. 13-96.

salud, dificultades crecientes que encontró en París, unidas a la guerra entre Holanda y Francia, todo ello contribuyó a provocar en el genial científico un estado melancólico que fue creciendo de año en año y que llegó a hacer temer por su sano juicio en los finales de su vida. Huygens falleció en 1695 en su tierra natal, carente de empleo.

El interés de Huygens por la *extraña refracción del cristal de Islandia* se inició en enero de 1673. El año anterior había leído en las Philosophical Transactions de la Royal Society la nueva teoría de Newton sobre la composición de la luz. Huygens, que contrariamente a Newton, creía en la naturaleza ondulatoria de la luz, criticó la teoría de Newton, sugiriendo que sólo se necesitaban dos colores para producir los efectos observados por aquél. Por aquella época, Huygens supuso que la doble refracción del espato de Islandia podía explicarse por la existencia de dos sustancias en el cristal, el éter y ciertas partículas materiales, de acuerdo con las ideas atomistas. Huygens se concentró primero en la labor experimental, especialmente en el estudio de los fenómenos producidos al hacer pasar los rayos refractarios por un cristal a través de otro. El avance real en la interpretación de la doble refracción se produjo en 1677, no en París, sino en La Haya. Sin lugar a duda, el encontrar la interpretación de la doble refracción debió constituir para Huygens una chispa de alegría en una persona pesimista como era, pues en sus notas de trabajo dejó escrito:

Eureka, 6 Aug. 1677. Causam mirae refractionis in Crystallo Islandia¹².

La nota, que se reproduce en sus obras, recoge la primera solución del problema, tal como Huygens la había concebido. Como puede verse en los esquemas de la figura, Huygens desde el principio consideró el cristal como formado por una serie de partículas esferoidales, ordenadamente dispuestas en forma de un empaquetado. La forma de estas partículas daba origen a unos frentes de onda que se podían representar por un elipsoide y una esfera, y de ahí los dos rayos. Todo ello claramente indica que para Huygens la propagación

¹² *Oeuvres*, p. 428.

de la luz y la teoría corpuscular del cristal estaban indisolublemente unidas.

Si hemos de creer en días propicios, Huygens nos proporciona un ejemplo de ello, pues dos años más tarde a la fecha en otra nota dice:

A Paris 6 Aout 1679. Eureka. La confirmation de ma théorie de la lumière et des refractions ¹³.

El tiempo transcurrido entre las dos Eureka constituye probablemente el momento más fecundo de Huygens en este campo, pues no sólo escribió en ellos la mayor parte del manuscrito de su tratado de la luz, sino que divulgó sus ideas en una serie de conferencias pronunciadas en *L'Académie Royale de Sciences* de París, donde residía. Si Huygens había terminado su manuscrito en esta época, como indica en el prefacio de su libro, ¿por qué esperó unos doce años para publicarlo? El mismo Huygens nos dejó una explicación a tan aparente abandono:

La razón estriba en que lo había escrito malamente en el idioma que se presenta ahora (francés), con la intención de traducirlo al latín para que atrajera mayor atención del público... Pero una vez pasada la satisfacción de la novedad, una y otra vez he diferido mi idea primera, y, ni siquiera sabía si podría terminarlo en vista de la frecuente interferencia de trabajos y estudios nuevos. No obstante, al considerar que dejándolo así, y esperando más tiempo, se corría el riesgo de perderlo, he decidido finalmente que es mejor dejarlo como está ¹⁴.

La decisión de Huygens fue acertada, pues el *Traité* contenía una interpretación totalmente nueva del fenómeno de la doble refracción y con ella un método que, conocido como la construcción de Huygens, constituye una de las teorías aceptadas por la ciencia y se encuentra incluida en todos los libros de óptica cristalina.

¹³ *Ibid.*, p. 441.

¹⁴ *Ibid.*, p. 454.

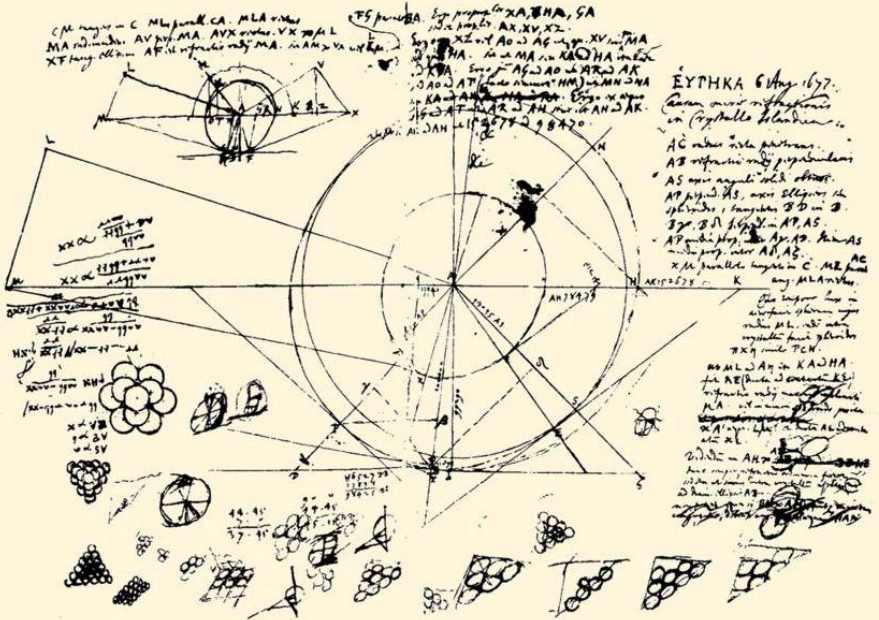


FIG. 13.- Manuscrito de Huygens en el que explica la doble refracción de la calcita y su interpretación estructural. Contiene el Eureka del 6 de agosto de 1677.

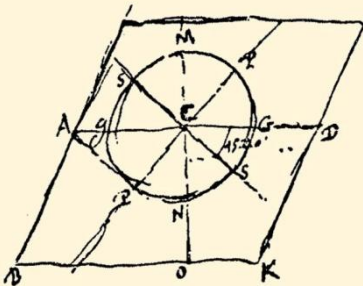


FIG. 14.- El Eureka de 1679. Huygens confirma su teoría sobre la doble refracción de la calcita.

LA LUZ COMO ONDAS

Con anterioridad a 1670 se admitía, en general, que la luz se propagaba instantáneamente, es decir, con una velocidad infinita. Tal opinión la mantenían científicos tan importantes como Kepler y Descartes. Huygens nunca aceptó esta idea. Su opinión vino confirmada por la célebre observación del danés Olaf Christensen Roemer (1644-1710) sobre los satélites de Júpiter. Roemer encontró que el período de revolución de uno de ellos dependía de la posición de la Tierra, concluyendo que el hecho sólo se podía deber a que la propagación de la luz tenía una velocidad finita, y así lo comunicó en 1676 a la Academia de Ciencias de París, de la cual era miembro, en una corta memoria titulada *Démonstration touchant le mouvement de la lumière*¹⁵. Aun cuando el valor que Roemer dedujo para la velocidad de propagación de la luz era erróneo, su experimento demostró claramente la velocidad finita de la luz.

Roemer tiene para nosotros interés adicional. En primer lugar, durante sus estudios en la Universidad de Copenhague, Roemer había sido ayudante de Erasmus Bartholinus en el tiempo en que éste descubrió la doble refracción de la luz por el espato de Islandia. En segundo lugar, Roemer llegó a París a finales de 1671, permaneciendo en el observatorio de la Academia entre 1672 y 1676, el período de su descubrimiento. Huygens era asiduo visitante del Observatorio, y de esta manera Huygens tuvo conocimiento directo del descubrimiento, que, como es natural, lo incluyó inmediatamente en su teoría de la luz. No cabe duda, tampoco, que Huygens se beneficiaría del conocimiento que Roemer tenía del experimento de Bartholinus, dada la buena amistad que existía entre ambos nórdicos. Estas circunstancias no minimizan en modo alguno la originalidad de la labor de Huygens en este campo.

Huygens fue el primer científico que formuló de manera clara y convincente la teoría de la naturaleza ondulatoria de la luz, y al mismo tiempo fue el primero en introducir el concepto de la variación de la velocidad de la luz como causa que explicara la

¹⁵ Roemer, *Démonstration touchant le mouvement de la lumière*, Memoria comunicada en 1676, y publicada en las *Memoires de l'Académie de Sciences* en 1730.

refracción al pasar de un medio a otro de diferente densidad. Huygens imaginó que cada punto de un frente de onda era en realidad el centro de una onda elemental, idea que le sirvió para desarrollar su célebre construcción geométrica de la refracción de la luz. Suponía este autor que las ondas luminosas se propagaban a través de un éter, que llenaba los poros que dejaban entre sí las partículas que forman un material. La diferencia de velocidad en un medio frente al espacio libre derivaba, según Huygens, de que las partículas materiales que forman el cuerpo obligan a las ondas luminosas a que se propaguen alrededor de dichas partículas. Para explicar la refracción de la luz de acuerdo con la ley de los senos de Descartes, Huygens propuso una construcción que le iba a hacer famoso.

La construcción que Huygens propuso se basaba en la hipótesis de que el frente de onda producido por la luz emanada desde un punto es una esfera, que representa el lugar geométrico alcanzado por la luz emanada desde dicho punto en un tiempo dado. Todo esto está de acuerdo con lo que hoy en día se acepta. La diferencia entre su teoría y la nuestra estriba en que Huygens suponía que las vibraciones tenían lugar en la dirección de propagación del rayo, es decir, la luz era un movimiento vibratorio longitudinal. La interpretación era errónea, tal como Fresnel hubo de demostrar más de un siglo después. La hipótesis errónea de Huygens tuvo importantes consecuencias, no sólo en su tiempo, sino, como veremos, especialmente a principios del siglo XIX.

INTERPRETACIÓN DE LA DOBLE REFRACCIÓN

La construcción de la marcha de los rayos luminosos en la refracción ordinaria proporcionó a Huygens la base para interpretar el fenómeno de la doble refracción. Para ello utilizó su concepto de frente de onda desde un punto y el hecho que las velocidades de los rayos ordinarios y extraordinarios eran diferentes, como se demostraba por sus diferentes índices de refracción. Huygens supuso que el rayo ordinario, cuyo índice de refracción no variaba con la dirección, estaba producido por la propagación de ondas esféricas en

el cristal de espato de Islandia. Como el hecho experimental demostraba que el índice de refracción del rayo extraordinario variaba con la dirección de propagación, Huygens ideó, acertadamente, que el rayo extraordinario era debido a la propagación de un frente de onda que no se podía representar por una esfera, sino por un elipsoide de revolución. Huygens utilizó la palabra esferoide, en vez de elipsoide. Para llegar a esta conclusión, Huygens llevó a cabo una serie de experimentos precisos, midiendo la refractividad de ambos rayos según direcciones distintas del cristal, direcciones que obtuvo tallando cristales según planos adecuados. Incluso inventó una técnica especial de tallado. Estas medidas le convencieron que el elipsoide óptico del rayo extraordinario era:

como una esfera comprimida, producida por la rotación de una elipse alrededor de su diámetro menor ¹⁶,

y que el eje de revolución del elipsoide era paralelo a lo que hoy sabemos es el eje trigonal, o eje principal, del cristal. Huygens observó también que, según esta dirección, ambos rayos, el ordinario y el extraordinario, se propagaban con la misma velocidad. Las propiedades ópticas que producen la doble refracción se podían explicar, según Huygens, por un elipsoide oblató y una esfera inscrita en él, cuyo diámetro común coincidía con el eje principal del cristal. Como Huygens decía:

Si ABPS es el esferoide según el cual la luz se extiende en el cristal en un cierto tiempo, y que sirve para explicar la refracción irregular, entonces la esfera inscrita BVST es el límite alcanzado en el mismo tiempo por la luz que sigue la refracción ordinaria ¹⁷.

A partir de este concepto, y utilizando la construcción que Huygens propuso para la refracción sencilla, se puede idear una nueva construcción gráfica que represente el camino de los rayos ordinario y extraordinario en el cristal, teniendo en cuenta la

¹⁶ Huygens, *Lumière*, p. 63.

¹⁷ Huygens, *Lumière*, p. 68.

dirección de incidencia de la luz y la sección del cristal según la cual los rayos refractados se propagan. Es necesario también el conocimiento de la orientación del elipsoide y sus dimensiones, es decir, los índices de refracción del rayo ordinario y extraordinario. Con todos estos elementos a nuestra disposición, podemos idear una construcción tal como se utiliza en libros de texto, esquema que se conoce como la construcción de Huygens para la doble refracción. Conviene indicar que, a pesar de que esta construcción y con este nombre figura en los libros de óptica cristalina, en realidad, no se debe a Huygens. La construcción que este autor propuso en su tratado fue mucho más compleja, y no merece la pena ser tratada aquí.

Huygens no pudo explicar todos los fenómenos que había observado con el espato de Islandia. En especial, hubo un hecho experimental que él mismo reconoció que no podía explicar con su teoría. El experimento era el siguiente: cuando se colocan dos cristales, uno encima de otro, y ambos en la misma orientación, observó que, en efecto, daban los dos rayos esperados. No obstante, cuando el superior se giraba con respecto al inferior, Huygens observó que los rayos se volvían a dividir en el cristal superior, dando origen a cuatro rayos. Pero cuando el cristal superior se giraba 180° con respecto al inferior, encontró que el rayo ordinario del cristal inferior se propagaba como extraordinario en el superior, y que el extraordinario del inferior lo hacía como ordinario en el superior.

Huygens relató esta dificultad con toda honestidad:

Parece que uno deba concluir que las ondas luminosas, habiendo pasado por el primer cristal, adquieren cierta forma o disposición, según la cual, cuando encuentran el tejido del segundo cristal en una cierta orientación, pueden excitar las dos sustancias que sirven a los dos tipos de refracción; y que cuando encuentran el segundo cristal en otra posición, sólo pueden mover una de dichas sustancias. Pero no he encontrado nada que satisfaga mi curiosidad de cómo lo hacen ¹⁸.

¹⁸ Huygens, *Lumière*, p. 91.

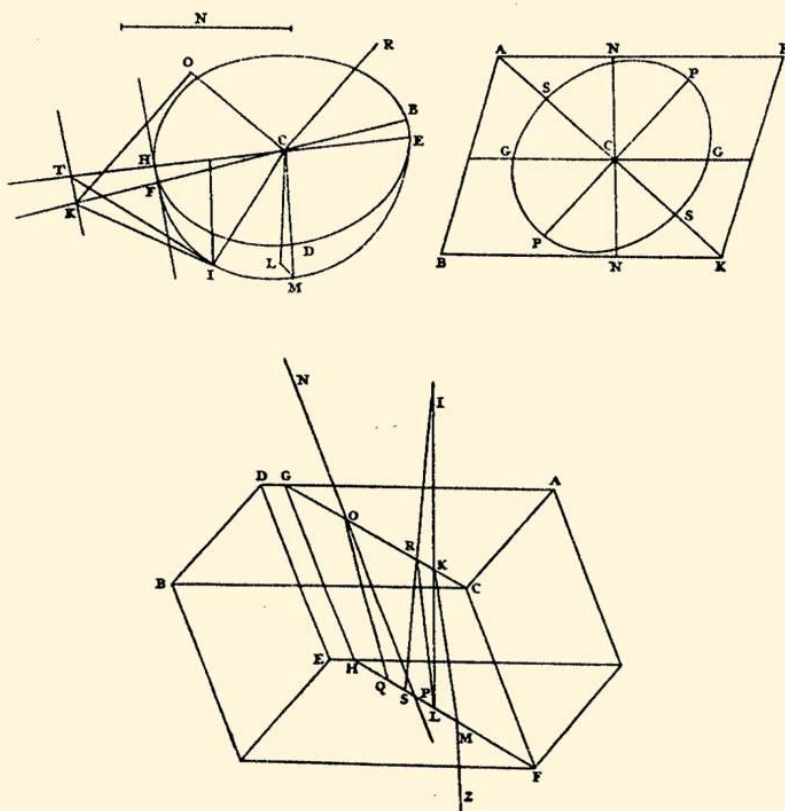


FIG. 15.- *Ilustraciones sobre la doble refracción de la calcita en el libro de Huygens sobre la luz.*

Solo cuando se abandonó la idea de que la luz era un movimiento longitudinal y se la sustituyó por un movimiento transversal, se pudo superar esta dificultad, que quedó explicada mediante el concepto de polarización de la luz. Pero para esto fue necesario esperar al siglo XIX y a los trabajos de Malus y Fresnel, como veremos oportunamente. La importancia de la obra de Huygens estriba en que este autor reconoció la anisotropía de una propiedad física del cristal y que esta anisotropía podía explicarse cuantitativamente por una figura, un elipsoide, con una orientación definida en el cristal. Además, para explicar esta anisotropía hubo de utilizar un modelo apropiado para la estructura del cristal. Vamos a ver ahora en qué consistía dicho modelo.

EL MÉTODO SINTÉTICO DEL ESTUDIO DEL CRISTAL

Huygens, en realidad, fue mucho más lejos que en buscar una explicación geométrica del fenómeno tal como él lo observó. La idea fundamental que rigió su interpretación fue el convencimiento de que estructura cristalina, morfología y propiedades físicas estaban estrechamente relacionadas entre sí. Era en realidad la utilización del método sintético al estudio del cristal.

Para Huygens,

la regularidad que se observa en estas producciones (= cristales) proviene de la disposición de partículas pequeñísimas, todas ellas iguales entre sí e indivisibles, que forman estos compuestos ¹⁹.

Como la teoría atomística no predeterminaba la forma necesaria de estas partículas, Huygens consideró que la mejor manera de explicar el frente de onda elipsoidal del rayo extraordinario era suponer un empaquetamiento de partículas elementales de forma también elipsoidal. Además supuso que el rayo ordinario era debido a la propagación de la luz a través del éter interpuesto entre aquellas partículas, y que el rayo extraordinario era debido a la propagación

¹⁹ Huygens. *Lumière*, p. 92.

de la luz a través del éter y de dichas partículas. Huygens razonó de esta manera la necesidad de partículas elipsoidales:

Me parece que la disposición o distribución regular de las partículas puede contribuir a la formación de ondas esféricas, pues para ello es suficiente que los movimientos sucesivos de la luz se propaguen un poco más deprisa en un sentido que en otro, y no dudé en absoluto que en este cristal puede existir tal distribución de partículas iguales y similares, debido a la forma exterior y sus ángulos de valor invariable y determinado ²⁰.

Esta cita de Huygens tiene especial importancia, porque demuestra que para él el comportamiento extraño de este cristal debía explicarse basándose en la existencia de una distribución regular de partículas anisótropas. Dicho de otra manera, la física cristalina no podía entenderse sin tener en cuenta la estructura íntima del cristal. Al utilizar partículas esféricas, en vez de esféricas, para explicar la estructura del espato de Islandia, no hacía otra cosa sino llevar a escala el hecho de la doble refracción, con sus valores reales. Pero Huygens se dio cuenta que no podía quedar satisfecho con un modelo que explicase el fenómeno de la doble refracción, a menos que este modelo explicara también la morfología del cristal y su exfoliación. Para ello hizo que la relación entre el eje de rotación del elipsoide y su diámetro fuera de $1/\sqrt{8}$, con lo que las propiedades ópticas y la morfología quedaban explicadas. La exfoliación, por otra parte, la explicó por el número de vecinos que habían de separarse al producir la exfoliación según un plano determinado. La forma de las partículas y su empaquetamiento regular producían tres planos equivalentes según los cuales la exfoliación era posible, de acuerdo con el experimento. La estructura estaba basada en un empaquetado pseudo-cúbico de partículas elipsoidales. Sólo cuando pudo explicar todas las propiedades físicas del espato de Islandia que él conocía, Huygens quedó satisfecho de su modelo comentado:

Ahora, puesto que los ángulos de nuestro cristal y la manera como se exfolia están de acuerdo perfecto con un compuesto formado por tales

²⁰ Huygens. *Lumière*. p. 58.

esferoides, tenemos poderosas razones para creer que estas partículas tienen esta forma y están ordenadas de esta manera ²¹.

Huygens no podía imaginar en esta época un modo más realista que el que produjo para el espato de Islandia. Incluso hoy en día, que conocemos la estructura de dicha sustancia, el modelo es acertado en términos generales. Por ejemplo, sabemos que la calcita posee una estructura de CaNa distorsionada, en la cual los aniones son los grupos CO_3 . Estos grupos son planos y de forma triangular, perpendiculares al eje principal del cristal y distribuidos en un empaquetado pseudo-cúbico. Como primera aproximación estos grupos pueden representarse por un elipsoide oblato, tal como Huygens hizo. En este momento, no es tan importante lo acertado o equivocado del modelo de Huygens, lo que importa es que la anisotropía óptica la explicó por la anisotropía de los grupos estructurales, tal como hoy en día se entiende el problema.

Huygens también observó que el cuarzo era birrefringente, aun cuando esta propiedad no era tan evidente como en el caso del espato de Islandia. En el caso del cuarzo, Huygens observó que el índice de refracción del rayo extraordinario era igual o menor que el del ordinario. Para explicar el fenómeno, ideó que las partículas que forman la estructura fueran elipsoides oblongos, empaquetados de forma semejante al caso anterior.

Tanto en un caso como en el otro, Huygens supuso un empaquetado de partículas elipsoidales. Es natural, por tanto, que se interesara en el estudio de empaquetados. Aunque este estudio no lo incluyó en su tratado, poseemos las notas que Huygens dejó preparadas para un apéndice a su tratado. En estas notas leemos:

En el primer estrato (del empaquetado) los esferoides están distribuidos de esta manera. En el segundo estrato, que está sobre éste, los centros de los esferoides se hallan sobre los puntos que están marcados con puntos. En el tercero, los esferoides están situados sobre los puntos OO. Y en el cuarto, los centros están sobre + +, es decir, sobre los centros del primer estrato. En el quinto, sobre los del segundo, y así sucesivamente.

²¹ *Lumière*, p. 93.

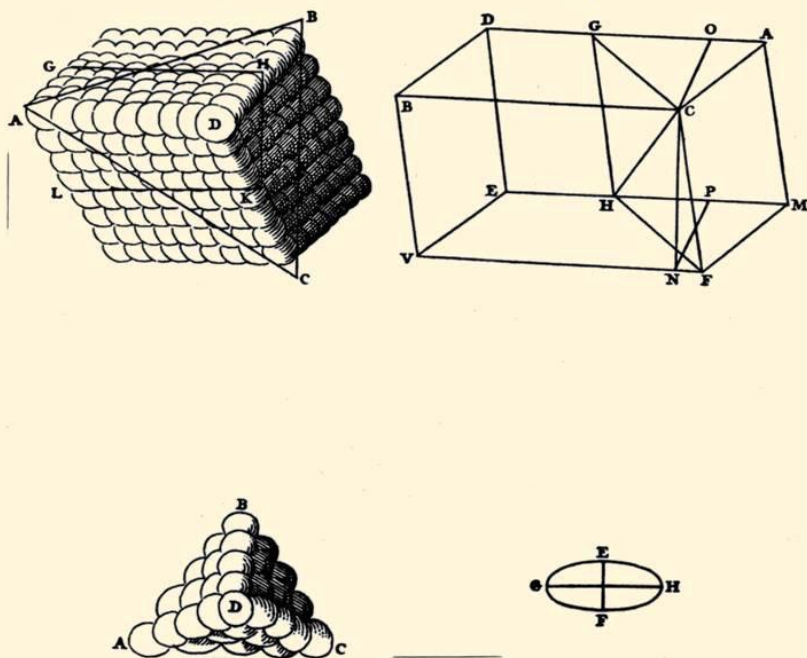


FIG. 16.- *Relación entre empaquetado y exfoliación de la calcita, según Huygens.*

Podemos preguntarnos por qué el tercer estrato elige los centros sobre OO, en vez de + +, porque uno es tan natural como el otro ²².

Huygens estuvo, por tanto, a punto de descubrir el empaquetado hexagonal. Pero al construir el modelo, se encontró con una imposibilidad mecánica, los esferoides se tocaban, y no se podían asentar debidamente. Este problema mecánico era una consecuencia de los esferoides que Huygens había construido, no una condición necesaria. Pero el inconveniente fue suficiente para que Huygens tratara sólo un empaquetado pseudo-cúbico, y que no descubriera el empaquetado hexagonal, que otra vez quedaba aguardando su momento.

NEWTON SOBRE LA DOBLE REFRACCIÓN

El análisis del trabajo experimental y teórico que sobre la doble refracción del espato de Islandia se llevó a cabo en el siglo XVII quedaría incompleto si no nos refiriéramos a la contribución que hiciera el físico más célebre de la época, Isaac Newton (1642-1727). La importancia que Newton ha tenido en el campo de la física justifica, por sí solo, tratar de su labor, aun cuando él no añadiera nada sustancialmente nuevo, ni sus observaciones fueran mejores que las de Huygens. La trascendencia de Newton se basa en la influencia y prestigio que alcanzó de tal manera que su autoridad en el campo de la física sirvió para minimizar la importancia de Huygens en el campo de la óptica cristalina.

Isaac Newton nació el 25 de diciembre de 1642 en la ciudad de Woolsthorpe, en el Lincolnshire inglés. Newton tuvo una niñez desgraciada, pues no conoció a su padre, que falleció antes de su nacimiento, y se quedó temporalmente sin el cuidado de su madre, ya que al casarse ésta tres años después de la muerte de su marido, dejó al chico bajo los cuidados de su abuela. Cuando su padrastro murió, Isaac volvió con su madre. Tenía ya dieciséis años. Estos trastornos familiares debieron ser decisivos en su vida, pues no se distinguió

²² *Obras*, pp. 544 y 545.

como estudiante en la Escuela del Rey de Grantham donde recibió las primeras letras, ni en el Trinity College de Cambridge, donde suspendió geometría, no pudiendo lograr una beca en 1663. Sus biógrafos han querido ver en su temperamento distraído, que de mayor se transformó en un carácter profundamente neurótico, la consecuencia de su separación del cuidado materno durante su niñez. Newton, como Huygens, permaneció soltero toda su vida.

La gran epidemia que asoló Londres en 1665 fue paradójicamente una feliz circunstancia en la vida científica de Newton. En efecto, la epidemia obligó al joven científico a retirarse al campo, proporcionándole el ambiente necesario para hacer de él el gran pensador y profundo científico que todos recordamos. Fue, precisamente, en 1666 cuando Newton llevó a cabo el histórico experimento de la descomposición de la luz al hacer atravesar un rayo de luz solar un prisma de vidrio. Con este experimento, Newton, a la sazón un joven de veinticuatro años de edad, entró por la puerta grande en el campo de la óptica. Con este bagaje científico a su favor, Newton regresó a Cambridge, donde le adjudicaron en 1669 la cátedra Lucasiana de Matemáticas, desde la cual profesó conferencias públicas sobre sus descubrimientos en óptica. En 1671 presentó su primer trabajo, también en este campo del saber, a la «Royal Society», que poco después le nombraría «Fellow» de la misma. Durante los años que siguieron a este honor, encontramos a Newton metido en una serie de controversias con variados científicos, especialmente con Robert Hooke, que había publicado su *Micrographía* en 1665. No sólo Hooke mantenía ideas contrarias a las de Newton sobre la naturaleza de la luz, sino que alegaba prioridad en el descubrimiento de la gravedad. La controversia fue tan dura, que afectó a las relaciones personales entre ambos científicos, que quedaron irreconciliables durante la vida de Hooke. En parte, esta controversia fue la responsable de la inesperada reacción de Newton no publicar nada más en el campo de la óptica. En efecto, Newton esperó hasta 1704, un año después de la muerte de Hooke, a publicar la primera edición de una obra que iba a ser célebre, su *Opticks; or a treatise of the reflexions, refractions, inflexions and colours of light*. Esta primera edición no contenía referencia alguna al fenómeno de la doble refracción a pesar de su importancia. La inclusión de este

fenómeno hubo de esperar todavía unos años más, hasta que revisó la cuarta edición que se publicó tres años después de su muerte, es decir, en 1730 ²³, en la cual añadió las Cuestiones 25 y 26, específicas de este problema.

El retraso en publicar su opinión sobre este asunto probablemente fue el resultado de su desacuerdo teórico con Huygens. Es interesante referirse aquí a la visita que hizo Huygens a Londres en 1689, donde ambos hombres de ciencia se conocieron. La ocasión fue la sesión de la «Royal Society» de 12 de junio de aquel año en la que Huygens informó a la docta institución acerca de su *Tratado de la luz* que había entregado a la prensa. Uno de los temas discutidos fue la doble refracción del espato de Islandia. Tal como se indica en el Libro de Actas de la Sociedad:

El Sr. Newton, analizando una pieza de cristal de Islandia, observó que de las dos especies de cosas que aparecen a través de aquel cuerpo, una no sufre reacción alguna cuando el rayo visual es paralelo a los lados oblicuos del paralelepípedo; el otro, como sucede en todos los cuerpos transparentes, sufre más cuando el rayo se hace perpendicular a los planos a través de los cuales el objeto aparece ²⁴.

La entrevista fue una desilusión para el anciano Huygens, pues no pudo convencer a Newton que su interpretación del fenómeno era acertada. Probablemente la reunión fue demasiado corta y Newton aparentemente creyó que lo que Huygens decía no era más que una consecuencia de la teoría ondulatoria de la luz, que Newton suponía errónea. Por consiguiente, si la teoría no era cierta, Huygens no podía haber dado con la solución de la doble refracción. El hecho de que Newton esperara tantos años en exponer su opinión fue, probablemente, consecuencia de que también él se encontró con

²³ Isaac Newton, *Opticks or a treatise of the reflections, refractions, inflexions and colours of light*, 4.^a ed. corregida, London, William Innys, 1730. Reprinted, con una introducción de E. T. Whittaker, McGraw-Hill, Co. Inc. N New York, 1931, XXVIII + 414 pp.

²⁴ Citado en David Brewster, *Memoirs of the life, writings, and discoveries of Sir Isaac Newton*. Edinburgh, 1855. Johnson Reprint Corporation, New York, 1965, p. 215.

dificultades al querer explicar dicho fenómeno. A pesar de todo, Newton reconoció la prioridad de las observaciones, tal como puede verse en la cuestión 25, en la que dice:

Un ejemplo de otra propiedad curiosa la tenemos en la refracción del cristal de Islandia, descrita primeramente por Erasmo Bartholinus, y más tarde, y con mayor exactitud, por Huygens, en su libro *De la lumière* ²⁵.

Newton, en realidad, no añadió nada nuevo a las observaciones de Bartholinus y Huygens; se limitó a describir el fenómeno, los dos rayos, y a confirmar los hechos que Huygens había observado en el paso de los rayos refractados a través de un segundo cristal. El fenómeno lo describió geoméricamente de la siguiente manera:

Sea -dice Newton- ADBC la superficie refractante del cristal, C el ángulo sólido mayor de dicha superficie, GEHF la superficie opuesta, y CK una perpendicular a esta superficie. Esta perpendicular forma con la arista CF del cristal un ángulo de 19 grados 3 minutos. Tracen KF y en ella tomen KL, de tal manera que el ángulo KCL sea de 3° 40' Y el ángulo LCF de 12° 23'. Si ST representa un rayo de luz cualquiera incidiendo en T bajo un ángulo cualquiera en la superficie ADBC, TV es el rayo refractado determinado por la relación de senos 5 es a 3, según las reglas ordinarias de la óptica. Trácese VX paralela e igual a KL. Trácese de la misma manera a partir de V la línea XV paralela a LF; trácese TX, esta línea será el otro rayo refractado de T a X por la refracción extraordinaria ²⁶.

Newton indicó que

existen dos rayos que difieran en su naturaleza, uno de los cuales en todo momento y en cualquier posición se refracta según la manera normal. La diferencia entre los dos rayos citados reside en las posiciones de los lados de los rayos con respecto al plano de refracción perpendicular ²⁷.

Newton explicó lo que quería decir cuando se refería a los lados de los rayos de la siguiente manera:

²⁵ Newton, *Opticks*, 4.^a ed., p. 354.

²⁶ Newton, *Opticks*, p. 356.

²⁷ *Ibid.*, p. 359.

Se puede considerar que cada rayo tiene cuatro lados o cuadrantes, dos de los cuales, opuestos entre sí, inclinan el rayo de acuerdo con la refracción ordinaria... y los otros dos... lo inclinan para que no pueda refractarse de la manera ordinaria ²⁸.

Un poco más adelante, la explicación es más clara:

Cada rayo de luz tiene, por tanto, dos rayos opuestos, inicialmente dotados con una propiedad de la cual depende la refracción extraordinaria, y los otros dos lados opuestos, que no gozan de tal propiedad ²⁹.

Newton era partidario de la teoría corpuscular de la luz. Era natural que considerara, por tanto, que las partículas de la luz pudieran ser atraídas por las partículas que forman los cuerpos, tal como a continuación nos dice:

y puesto que el cristal por su disposición o virtud no actúa sobre los rayos a menos que uno de sus lados de refracción extraordinaria se oriente hacia aquel lado, esto parece indicar la existencia de una virtud o disposición en aquellos lados de los rayos, que reaccionan y simpatizan con la virtud o disposición del cristal, como los polos de dos imanes responden uno al otro³⁰.

Al pasar el tiempo, y gracias a los experimentos de Malus, esta frase de Newton se quiso ver como una sugerencia de la polarización, fenómeno que tomó el nombre precisamente de esta frase, que Malus citó. Pero en realidad es difícil ver en los textos citados, y en el resto de su obra, nada que pueda afirmar que Newton pensara en la polarización. La atracción de las partículas de luz por el cristal no podía constituir una explicación adecuada de los fenómenos observados. Este concepto de atracción entre partículas fue la idea que Newton utilizó para explicar la ordenación de las unidades estructurales en el cristal. Así, dice:

²⁸ *Ibid.*, p. 360.

²⁹ *Opticks*, pp. 360-361.

³⁰ *Opticks*, p. 373.

Y puesto que las partículas del cristal de Islandia actúan todas ellas de la misma manera sobre los rayos de luz para producir la refracción extraordinaria, no se puede pensar en otra cosa más que en la formación de este cristal, las partículas no sólo se agrupan en orden y formación para dar origen a las figuras regulares, sino que además por su virtud de alguna causa polar, tienen sus lados homogéneos todos en la misma orientación ³¹.

Por lo tanto, según Newton, la propiedad de las unidades que forman el cristal era la causa de la doble refracción. De la anterior se deduce que Newton comprendió que la morfología externa era una consecuencia de la distribución ordenada, en orden y formación, como él decía, de partículas duras, y que la cohesión entre ellas era debida a la existencia de fuerzas de atracción de cierto tipo, y de la impenetrabilidad natural de la materia. Para aclarar este punto, vale la pena reproducir aquí otro pasaje de su obra:

Puedo deducir de su cohesión que sus partículas se atraen mutuamente por virtud de algún tipo de fuerza que en contacto inmediato es extraordinariamente intensa, a pequeñas distancias lleva a cabo las operaciones químicas, y no alcanza más allá de las partículas con efectos sensibles ³².

Basándose en la hipótesis corpuscular de la luz, Newton rechazó la interpretación de Huygens, que se basaba en la teoría ondulatoria de la luz. Uno de los motivos en que se apoyaba Newton para tomar esta actitud era la imposibilidad que Huygens mismo encontró en explicar el fenómeno observado cuando se superponen dos cristales. Otro fue su creencia en la *disposición natural e inmutable de los rayos*. Esta creencia, que cita numerosas veces en su texto, eliminaba la posibilidad de que los rayos, al atravesar el cristal, recibieran una modificación tal que pudieran explicar los fenómenos que Huygens había observado. Si comparamos la profundidad y elegancia del tratamiento del problema tal como Huygens lo hizo en su libro, con la superficialidad y estilo casi escolástico de las cuestiones 25 y 26 del libro de Newton, hace difícil, para nosotros, comprender que Newton prevaleciera sobre Huygens. Pero así fue, y nuestra ciencia

³¹ *Opticks*, p. 388.

³² *Opticks*, p. 389.

hubo de esperar más de un siglo hasta que el fenómeno fuera interpretado correctamente basándose en las ideas de Huygens. En realidad, los científicos que siguieron en el tiempo estaban convencidos de la genialidad de Newton. Incluso hoy en día, un Einstein nos dice de este autor que:

La naturaleza era para él un libro abierto, cuyas palabras podía leer sin dificultad ³³.

Lo que pasó en aquel tiempo nos induce a pensar lo peligroso que es para la ciencia crear un mito, y lo difícil y costoso que es eliminarlo una vez establecido. Lo que hace que la ciencia avance es un sentido de humildad, un sentido de constante revisión; basarse en el sentido de autoridad tiene siempre un resultado negativo, puesto que lo que hemos de tener presente es la idea de la provisionalidad de nuestro conocimiento, y estar dispuestos a aceptar ideas nuevas y vivas, incluso si no están de acuerdo con lo que en un momento dado se considera como conocimiento aceptado por la comunidad científica.

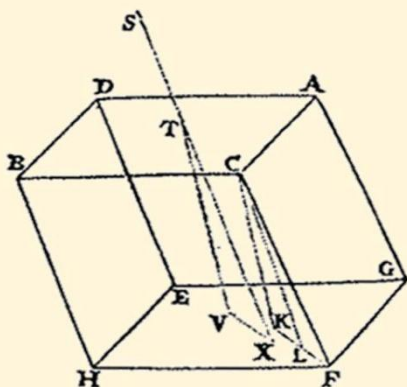


FIG. 17.- *La doble refracción de la calcita, según Newton.*

³³ *Opticks*, p. VII.

ÍNDICE DE REFRACCIÓN Y DENSIDAD

En otro orden de ideas, Newton encontró una relación sencilla entre lo que él denominaba fuerza refractante y densidad. Este descubrimiento fue expresado en la proposición siguiente:

Si la luz es más rápida en los cuerpos que en el vacío, en la proporción de los senos de los ángulos que miden la refracción de los cuerpos, las fuerzas ejercidas por los cuerpos sobre la luz reflejada y refractada son aproximadamente proporcionales a las densidades de dichos cuerpos, excepto los que son untosos y sulfúreos que refractan más que los otros cuerpos ³⁴.

A pesar del error fundamental de que la velocidad de la luz es menor en el vacío que en los cuerpos, la relación entre índice de refracción y densidad es clara. Para demostrar esta dependencia, Newton relacionó una serie de índices de refracción con la densidad, diciendo que:

El pseudo topacio, el yeso, el cristal de roca, el cristal de Islandia, el vidrio ordinario (que es arena fundida) y el vidrio de antimonio... tienen todos ellos poderes refractivos prácticamente en la misma proporción que sus densidades respectivas, excepto que la refracción de la extraña sustancia del cristal de Islandia es un poco más elevada que el resto ³⁵.

Esta parte de su investigación tiene el interés adicional de mostrarnos algunas de las ideas que este gran hombre de ciencia tenía sobre la composición química. Para él, las sales y los vitriolos estaban formados por agua y tierra; también creía que el azufre era otro de los elementos que constituían los sólidos. En este particular, Newton decía que:

³⁴ *Opticks*, 1.^a ed., p. 74.

³⁵ *Ibid.*, p. 76.

El poder refractivo de todos los cuerpos depende, si no totalmente, al menos en parte, de la abundancia de azufre. Pues es probable que todos los cuerpos contengan más o menos abundantemente azufre ³⁶.

Estas citas demuestran, como era de esperar, que Newton era un producto de su tiempo y, por tanto, creía en las ideas propias de la Yatroquímica, que serán estudiadas con mayor detalle en el Capítulo 5.

³⁶ *Opticks*, 1.^a ed. Prop. X, pp. 70 y 71. En (Newton), *Opticks; or a treatise of reflexions, refractions, inflexions and colours of light. Also two treatises of the species and magnitude of curvilinear figures*. London, Sam. Smith and Ben. Walford, Royal Society, 1704, II + 211 pp.

5. NACIMIENTO DE LA CRISTALOGRAFIA

YATROQUÍMICA

Cuando, con la perspectiva que nos confiere el tiempo, miramos hacia atrás la historia de la ciencia de los cristales, difícilmente podemos comprender por qué las ideas de Stensen, Hooke y Huygens no excitaron más la mente de otros pensadores y por qué no tuvieron seguidores inmediatos. En realidad, los primeros momentos de la nueva ciencia fueron como una gran obertura sin continuación. Podemos aventurar, con todo, cierta interpretación de una situación sin precedentes. Stensen fue probablemente un mero accidente en la vida científica de Florencia; Hooke fue simplemente ignorado después de su muerte no sólo porque Newton hizo lo posible para desacreditarlo, sino porque Newton fue aceptado como el pontífice del nuevo saber; Huygens, por su parte, fue un extranjero no sólo en Francia, sino, al final de su vida, en su propia patria, situación que se empeoraba en el campo científico por mantener una teoría, la teoría ondulatoria de la luz, en oposición a la aceptada por Newton, la autoridad del momento. Vale la pena indicar, como prueba de lo que se acaba de decir, la opinión de Jean-Louis Alleon-Dulac expresada en una voluminosa obra titulada *Mélanges d'Histoire Naturelle*¹, publicada en Lion en 1765. En ella Alleon-Dullac no hace

¹ Jean Louis-Alleon-Dulac, *Mélanges d'Histoire Naturelle*, Lyon, 1765 (Landmarks of Science).

referencia a Hooke, Huygens ni Bartholinus, sí sólo hace un pequeño resumen del *Prodromus* de Stensen. El resumen se refiere a la formación de minerales cristalizados y dice:

los físicos modernos creen que este fenómeno viene producido por la naturaleza de la misma manera y siguiendo las mismas leyes que la cristalización de las sales en el laboratorio del químico. Stensen sólo está interesado en el lugar donde los cristales adquirieron la materia nueva cuando la alcanzan, en su opinión, por yuxtaposición, es decir, añadiendo sucesivamente y de manera regular materia nueva sobre las caras externas del cristal ya formado, y no por una especie de vegetación o nutrición ².

Comentaba Alleon-Dulac que era una pena que las ideas de Stensen no fueran tan modernas como podía esperarse de una investigación reciente. Alleon-Dulac no había comprendido la obra del genial danés, y mucho menos su observación de la constancia de los ángulos. Y su obra databa de mediados del siglo XVIII, cuando ya se habían realizado muchos avances en el campo de la ciencia de los cristales.

Si el impacto de los grandes fundadores de la nueva ciencia de los cristales no tuvo mayor importancia en el campo de las ideas científicas, el estudio de los cristales no fue, a pesar de todo, abandonado. Por el contrario, el conocimiento aceptado en la época en el campo de la química, la llamada yatroquímica, iba a proveer la base sobre la cual se extendería el interés de los hombres de ciencia en los materiales cristalinos.

La yatroquímica, que puede considerarse iniciada por Paracelso (1493-1541), aceptaba una teoría modificada de los cuatro elementos, en los cuales, azufre, mercurio y sal eran los principios activos que estaban asociados a unas cualidades tales como combustibilidad, fluidez e inerte, respectivamente. De estos principios, la yatroquímica consideraba la sal, que no debe confundirse con la sal común, sino que tenía un significado metafísico, como el responsable de la existencia de los sólidos. Debido a esta relación entre sal y sólido, el estudio de la morfología cristalina adquirió cierta importancia, puesto que la forma geométrica del cristal se suponía

² *Ibid.*, vol. V, pp. 166-172.

que era el resultado del efecto modificador sobre el elemento primario producido por la mezcla (el ácido, en nuestra nomenclatura). Buscando métodos analíticos que les permitiera identificar el ácido que modificaba la sal primaria, los yatroquímicos se interesaron, lógicamente, en los materiales cristalinos y al hacer esto, estudiaron la morfología del cristal. A pesar de este interés, la contribución de la yatroquímica a la ciencia de los cristales fue, en general, de poca importancia: sólo Domenico Guglielmini merece cierta consideración.

Domenico Guglielmini nació el 25 de septiembre de 1655 en Bolonia, una de las ciudades italianas donde el interés científico permanecía vivo gracias a las personalidades que su Universidad había reunido por aquella época. Fue en esta Universidad donde el joven Guglielmini estudió matemáticas con un famoso matemático, Geminiano Montanaro y medicina con el célebre Marcello Malpighi. Vale la pena señalar aquí que cuando Stensen publicó en abril de 1669 su *Prodromus*, el autor envió sendos ejemplares a estos dos maestros de Guglielmini. Otro punto de interés que explica ciertos hechos de la vida profesional de Guglielmini es el dato que tanto Montanaro como Stensen estaban interesados en hidrología en general y en las propiedades de los líquidos en particular. Debido a este interés de Montanaro, es lógico suponer que la influencia de su maestro le indujera hacia este tipo de estudios, pues, en efecto, hallamos a nuestro hombre a cargo de los servicios hidrológicos de la ciudad en 1686, sólo ocho años después de haber recibido su doctorado. Fue poco después, precisamente en 1688, cuando Guglielmini presentó a la Academia Filosófica Experimental de su ciudad su obra *Reflessioni filosofiche dedotte dalle figuri di sali*. No sabemos a ciencia cierta si Guglielmini tuvo conocimiento directo del *Prodromus*, puesto que no cita a Stensen en su trabajo, pero casi podemos asegurar que el estudio de los cristales de Guglielmini fue motivado por Stensen a través de Montanaro. El hecho de que Guglielmini redescubriera la ley de la constancia de los ángulos parece confirmar esta aserción. Dicha ley fue formulada por nuestro autor de manera mucho más precisa que lo hiciera Stensen, como puede deducirse por la siguiente cita, sacada de su obra:

Constante es, desde el principio de la cristalización, la inclinación de las caras y (el valor de) los ángulos, incluso en un cristal no perfectamente desarrollado, incluso cuando su perímetro cambia ³.

Guglielmini llegó a esta conclusión después de un detallado estudio de los cristales de cinco sales: nitro, sal marina y sal de roca (que él consideró diferentes), vitriolo y alumbre. En dicho estudio, no sólo se fijó en la morfología de los cristales, sino que midió los ángulos siguiendo el método que Stensen había ya iniciado, es decir, trazando en un papel el perímetro de las caras del cristal correspondiente. Como resultado de su investigación Guglielmini identificó cuatro tipos fundamentales de formas cristalinas, cada uno de ellos correspondiente a un tipo de sal. Así, el cubo correspondía a la sal de roca y marina; el prisma de seis o de tres caras correspondía al nitro; el octaedro que correspondía al alumbre y el paralelepípedo romboidal que era la forma del vitriolo (sulfato de cobre).

Guglielmini adelantó, además, la importante hipótesis de que los cristales de cada una de estas sales tenían una forma que le era propia, forma que resultaba de la agrupación de partículas individuales, muy pequeñas y todas ellas de idéntica forma al cristal macroscópico. La agregación paralela de estas partículas geométricas idénticas constituía la razón de la forma cristalina y de la constancia de sus ángulos.

Esta idea era idéntica a la que un siglo después habría de servir a Haüy para fundar su teoría del cristal. La hipótesis de Guglielmini contenía también implícita la idea de homogeneidad, tan importante en nuestro concepto de cristal.

³ Karl Mieleitner, *Die Anfänge der Theorien über die Struktur der Kristalle*. Domenico Guglielmini, «Philosophische Betrachtungen, Abgeleitet von der Formen der Salze», *Fortschritte Min. Krist. und Petro.*, 8 (1923), 199-234, especialmente página 219.

PHILLIPPE DE LA HIRE

A pesar de que el cartesianismo ya era decadente a finales del XVII, todavía podemos encontrar la influencia viva de Descartes en el célebre astrónomo francés Philippe de la Hire (1640- 1718), uno de los primeros miembros de la Academie des Sciences. A nosotros nos interesan sus *Mémoires de mathématique et de physique*⁴, especialmente el capítulo *Explication des principaux effets de la glace, et du froid*⁵ porque en ella vuelve a encontrarse la idea de que la sal era el principio responsable de la cristalización.

Es interesante considerar aquí las ideas de la Hire, según las cuales la formación del hielo se debía a la paralización puramente mecánica del movimiento de las partículas de agua. Así dice que:

sólo ciertas sales son capaces de parar el movimiento de las partículas de agua, y sólo existen un corto número de estas sales mezcladas y asociadas a la sal común, pero en mayor cantidad en la sal de piedra, y mayor todavía en la sal de amoníaco. Las partículas de sal son delgadas, largas, redondas y apuntadas, y consecuentemente pueden entrar en todos los metales e incluso en el vidrio, y esas partículas pueden ser arrastradas por el aire en su movimiento. Finalmente las partículas de agua se paran más fácilmente en estas sales que en cualquier otro cuerpo sin olvidar las demás, y por tanto, estas sales se unen más fácilmente al agua que a otros cuerpos.

Si suponemos, con Descartes -dice la Hire- que las partículas de agua son largas y flexibles, no encontraremos dificultad alguna en ver que puedan pararse fácilmente sobre ellas, simplemente adosándoles otro movimiento que el de las partículas de sal a las cuales están agregadas, y que al perder el movimiento cesan de formar un fluido⁶.

La Hire observó que la formación del hielo empezaba como un ribete en el frasco que contenía el agua, lo que le indicaba que la movilidad de las partículas de sal venía impedida por las paredes del receptáculo. El hecho de que el hielo formara agujas sobre dicho ribete sólido, indujo a la Hire a suponer que:

⁴ Philippe de la Hire, *Mémoires de mathématique et de physique*, Imprimerie Royale, París, 1694, p. 302.

⁵ *Ibid.*, pp. 97-213.

⁶ *La Hire, Mémoires*, p. 47.

Las primeras partículas de hielo deben retener la forma de las partículas de sal que sirven para iniciar la cristalización ⁷.

En la época de la Hire era bien conocido el fenómeno del aumento de volumen del agua al transformarse en hielo. Para explicar este fenómeno, nuestro autor vuelve a utilizar ideas estrictamente mecánicas, tal como sigue:

Un número dado de pequeñas agujas agrupadas según su longitud ocuparán mucho menos volumen que si parte de ellas se cruzan entre sí ⁸.

La Hire, como matemático que era, fue atraído por los trabajos de aquel otro matemático Erasmo Bartholino. Debido a ello se interesó por la doble refracción de la calcita y de la birrefringencia en el cuarzo que Huygens había descubierto recientemente. Las razones de este interés eran claras para la Hire, según se deduce de lo siguiente:

Si alguien quisiera dar a los filósofos un desafío importante con relación a los principios que aceptan, el ejemplo del cristal de Islandia es el adecuado. Una vez se ha conocido que existe refracción en el agua y en el vidrio, ellos podrían suponer que cualquier otro cuerpo transparente se comportaría de manera semejante, no diferenciándose en nada más que las diferentes relaciones entre los senos de incidencia y refracción, que dependen de las densidades de los cuerpos. Sin embargo, en 1670, para su desconcierto, ha aparecido en un libro del danés Erasmo Bartholino el cristal de Islandia, que transforma las reglas establecidas, o mejor aún, que muestra otras nuevas, totalmente imprevisibles ⁹.

Atraído por el fenómeno, estudió la Hire el yeso, variedad especular, abundante en las cercanías de París, descubriendo en él la birrefringencia que ya se conocía en la calcita y el cuarzo. Pero el yeso, además se exfolia, y ello le sirvió para razonar su formación y crecimiento, siguiendo las ideas de Stensen. Según la Hire,

⁷ *Ibid.*, p. 98.

⁸ *Ibid.*, p. 98.

⁹ De la Hire, *Histoire de l'Academie des Sciences*, 1710. *Mémoires*, p. 121.

podemos suponer que la masa de estas piezas de talco (yeso) están formadas por estas hojas que no están fuertemente unidas entre sí, y que cada hoja está formada por pequeñas laminillas triangulares..., cada uno de estos triángulos elementales tiene tres ángulos agudos desiguales de 50, 60 y 70 grados, respectivamente, como pueden verse en los fragmentos de las laminillas cuando se separan, y que no son nada más que conjuntos de estos triángulos elementales que forman triángulos similares a sus elementos; pues estas laminillas que son frágiles producen los mismos ángulos cuando se rompen ¹⁰.

Como prueba de lo que decía, la Hire incluyó dibujos de los ángulos de las líneas de crucero del yeso. Es interesante hacer constar que Huygens había hecho ya estos dibujos en sus notas, y que Huygens era uno de los asiduos asistentes al observatorio donde el astrónomo la Hire trabajaba. Quizás la Hire no hizo más que repetir lo que le había indicado a Huygens, pero no tenemos evidencia de ello.

CRISTALES A ESPUERTAS: LEEUWENHOEK Y SU MICROSCOPIO

Entre las personalidades científicas que Holanda, o mejor, los Países Bajos produjeron en los siglos XVII y XVIII, quizás ninguna representa mejor el país que Leeuwenhoek. Hijo de un cestero y nieto de un cervecero, Antonio Leeuwenhoek nació en la ciudad de Delft el 24 de octubre de 1632. Huérfano de padre a temprana edad, Antonio dejó la casa paterna al poco tiempo de las segundas nupcias de su madre. Su educación fue defectuosa, pues sólo pudo seguir las primeras letras en la escuela de Warmond, trasladándose después a Benthuisen, donde un tío suyo que ejercía abogacía, le empleó como amanuense. A los diecisiete años de edad, el joven Leeuwenhoek entró a trabajar como cajero en un negocio de tejidos de un cierto escocés, quien dejó al joven amigo el negocio cuando, debido a las guerras entre Inglaterra y Holanda, el escocés no pudo atenderlo. Los negocios debieron irle bien al joven Leeuwenhoek pues en 1654 se casaba y pudo comprarse una casa en el barrio de Hipolito de la

¹⁰ *Ibid.*, p. 347.

ciudad, donde inició un negocio propio en el ramo textil. Pero pronto iba a abandonar una ocupación que no le llenaba. En 1660, Leeuwenhoek fue nombrado Chambelán de los Sheriffs de su ciudad, recibiendo una pequeña suma adicional por la limpieza del despacho. La pérdida de su mujer en 1666 cambió su vida, pues habiendo conseguido la sinecura de Alderman en 1667 buscó refugio en los estudios, afición que iba a transformarle bien pronto en uno de los hombres más célebres de su tiempo. Fue por esta época, o quizás unos años más tarde, posiblemente en 1671, cuando Leeuwenhoek, a la sazón bordeando los cuarenta, construyó su famoso microscopio. A ello contribuyó probablemente su familiaridad con lentes de aumento, utensilio corriente en la industria textil de la época.

Este instrumento era muy sencillo: se trataba de una lente esférica situada entre dos placas de cobre, y un eje, en el que ponía la muestra a estudiar. La lente era una sencilla gota de vidrio, de diámetro muy pequeño. Pero esto era precisamente lo importante, pues como la distancia focal era de unos pocos milímetros (entre 1 y 2,5) permitía aumentos del orden de los 480, mucho mayores que cualquiera de los instrumentos similares que existían en el mercado. Con él y gracias a su gran habilidad y constancia, Leeuwenhoek, iba a realizar una serie de descubrimientos, especialmente en el campo de la histología, que le iban a deparar pronto una bien merecida fama. Tan célebre fue su microscopio que en su vida llegó a construir unos 500. Sus microscopios le proporcionaban uno tras otro, trascendentales descubrimientos, que le introdujeron a través del anatómico Reinier de Graaf, en la Royal Society de Londres, siendo nombrado, después de una serie de comunicaciones a la misma, miembro de ella en 1680. Por entonces su vida había tenido otro cambio de rumbo, pues pocos meses antes había logrado ser nombrado catador o comprobador de vinos de la ciudad de Delft, cargo que le hizo entrar de lleno en el estudio de los cristales. El lector se preguntará, ¿y qué relación puede tener los vinos con los cristales? La pregunta tiene mucho más interés de que lo que parece, pues Leeuwenhoek creía, de acuerdo con los conocimientos de su tiempo, que el sabor salado y el amargo eran producidos por la acción de las partículas puntiagudas de la sal, el principio que constituía la base de la yatroquímica. El estudio de los diminutos

cristales que se formaban en las gotas o en los fondos de los vinos era, por tanto, de interés fundamental, a la par que de inmenso valor práctico¹¹.

La mayor parte de las observaciones de Leeuwenhoek, en el campo de los cristales, trataban de la cristalización de soluciones naturales o artificiales, conteniendo sus cartas muchos dibujos de los cristales y dendritas que dicho autor había observado. Sus descripciones, con todo, eran siempre demasiado superficiales y denotan en todo momento que se trata de un amateur más que de un científico. Si esto es un defecto, por otra parte su cúmulo de observaciones es de tal grado, que debemos considerarlo como uno de los grandes observadores de cristales, puesto que estudió cristalizaciones de sal común, sal de cardos, sulfato potásico, bisulfato potásico, sal de absenta, sulfato de zinc, sulfato sódico, sal amoniaco y muchas otras sustancias.

Como buen observador que era, Leeuwenhoek fue el primero en indicar que la variación de las dimensiones relativas de un cristal se debía a una deficiente difusión del líquido debido a la interferencia del crecimiento de cristales próximos. Así dice:

La razón de por qué algunas tienen una base paralelográfica la encuentro en lo que sigue: A y B son dos partículas próximas con dos lados próximos y dos alejados. Siendo esto así, los lados que eran próximos prohíben el flujo del líquido mucho más que los otros lados opuestos, como las partículas C, D, E Y F, que se hallan a mayor distancia de las otras y no tienen la competencia de las partículas que les rodean y, por tanto, son cuadrados¹².

Una de las razones para su extenso estudio de cristalizaciones, que abarcaron un gran número de vinos de variadas denominaciones y orígenes, fue, como se ha indicado antes, que Leeuwenhoek fue probador de vinos de la ciudad de Delft desde 1679. Lo que buscaba nuestro personaje era la forma de las partículas elementales, puesto

¹¹ Su trabajo ha sido reunido en *The Collected letters of Antoni van Leeuwenhoek*, Amsterdam. Swets y Feitlinger, Ltd., 1939, Ocho vols. que hemos utilizado como fuentes.

¹² *Collected Letters*, vol. 1, pp. 241 Y 243.

que creía, como se aceptaba en su época, que dicha forma era responsable del sabor. El propio Leeuwenhoek se refiere a su investigación de la siguiente manera:

En variadas ocasiones un eminente señor de nuestra ciudad me ha urgido que examine ciertas sales. Lo cual, sin embargo, he rehusado hacer, porque no sólo tal investigación requeriría mucho trabajo, sino también porque los intentos que he llevado a cabo han fallado ¹³.

Leeuwenhoek perfeccionó y depuró sucesivamente su técnica, dejando cristalizar una gota de solución en una pieza plana de vidrio. Lo que encontró parecía confirmar sus ideas de que las partículas puntiagudas daban el sabor ácido al herir la lengua, y que el dulzón provenía de partículas muy solubles y de glóbulos, pues en sus cristalizaciones observó ambas cosas. Leeuwenhoek creyó realmente que estaba observando las partículas elementales de sal, anticipando que un cristal de sal de roca estaba formado «por miles de millones de partículas, cada una de ellas con una forma cuadrada o cuadrática exacta» ¹⁴, idea similar a la que mantenía Gassendi.

La contribución de Leeuwenhoek a la ciencia de los cristales fue considerable no sólo en cuanto a la cantidad, sino de gran calidad, pues demostró que dicha ciencia abarcaba casi todos los campos de investigación. Si no fue original en las ideas, su notable capacidad de observación le hizo notar la existencia de cristales «formados sólo por la mitad de la figura» ¹⁵, anticipándose así más de un siglo al

¹³ *Ibid.*, vol. V, p. 5.

¹⁴ *Collected*, vol. V, p. 21.

¹⁵ *Ibid.*, vol., p. 9.

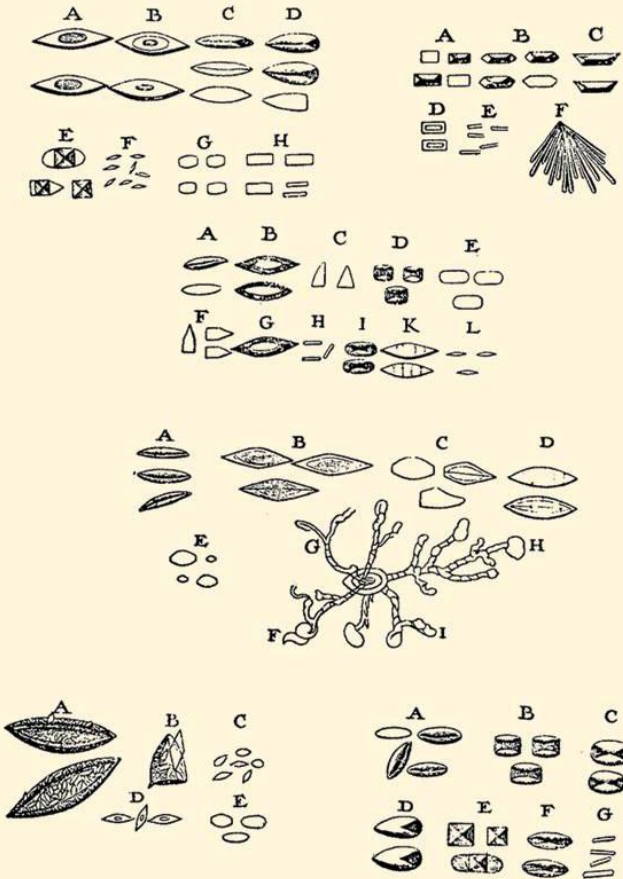


FIG. 18.- *Cristales varios de Leeuwenhoek.*

descubrimiento de los cristales hemimórficos, que dicho sea de paso, un Haüy no entendería.

Leeuwenhoek no era el único que creía en la sal como elemento básico de la cristalización: Guglielmini, la Hire, y otros lo mantenían también, pues era el conocimiento aceptado de la época. Como otro ejemplo baste citar a Martin Kähler (1728-1773) quien en 1749 publicó su obra *Specimen de Crystallorum generatione* ¹⁶ donde se dice:

Las formas poliédricas del reino lapídeo (excepto las petrificaciones) se producen por la sal; la sal es la causa única de la cristalización; las sales actúan siempre en solución, por tanto, en forma fluida, los cristales lapídeos, tales como cuarzo y calcita sólo difieren en forma. Todos los cristales nacen de fluidos. La figura de cristales con natrón están formados por nitro; por tanto, los cristales lapídeos están formados por sales. Esto viene confirmado por su matriz, lugar, color, transparencia y propiedades.

El cartesianismo de la Hire era en realidad compartido por otros compatriotas suyos. Entre ellos vale la pena citar a Jean Jacques Dortous de Mairan, que publicó en París en 1749 una obra titulada *Dissertations sur la glace* ¹⁷.

En ella encontramos muchas de las ideas expuestas por la Hire, especialmente en cuanto se refiere a que la congelación se debía a una disminución del movimiento de la materia sensible. Como producto de la época, Mairan creía en el efecto cristalizador de una sal, el nitro, al cual atribuía la formación del hielo. Así dice que:

El nitro sutil que a veces se extiende por todo el aire causa, incluso en el medio del verano, un frío tan violento que los ríos y los lagos se hielan ¹⁸.

Mairan incluyó también otras sales como la sal amoniaco, entre los agentes criogenéticos, y por tanto cristalizadores. La

¹⁶ Martín Kähler, «Specimen de Crystallorum generatione», *Car. Linnaei Amoenites Academiae*, 5 (1749).

¹⁷ Dortous de Mairan, *Dissertation sur la glace, ou explication physique de la formation de la glace, et de ses divers phénomènes*. Imprimerie Royales, París, 1749, XXIX + 384 pp. V tablas y una tabla de materias.

¹⁸ Mairan, p. 43.

cristalización era, para nuestro autor, consecuencia de la agregación de partículas salinas de formas constantes, de tal manera que el cristal surgía por el apilamiento de dichas partículas; así dice:

La sal marina produce cubos o pirámides huecas en los cuales las agujas son paralelas a los lados de los cuadrados que forman el cubo ¹⁹.

Mairan que creía que un cubo estaba formado por una serie de pirámides, todavía no había comprendido la idea de homogeneidad producida por el apilamiento paralelo de unidades iguales, tal como puede verse en el siguiente párrafo

Un cubo puede suponerse formado por la aposición de planos de tales fibras unas sobre otras. Cada pirámide está formada por nada más que planos u hojas de agujas paralelas, y paralelas también a la pirámide que le es directamente opuesta por el vértice, pero perpendiculares a las que forman las cuatro pirámides adyacentes y contiguas ²⁰.

Para explicar el aumento de volumen del hielo con respecto del agua Mairan ideó el siguiente modelo. Supongamos un apilamiento de tochos de madera en el cual todos los tochos son paralelos. Esta disposición da el empaquetado más denso; pero si ahora los tochos de un piso se colocan en dirección perpendicular a la de los tochos del piso inferior, el volumen resultante será mayor. La relación de volúmenes es de $2/\sqrt{3}$, aproximadamente $7/6$, que corresponde a la expansión observada en la formación del hielo. Aun cuando el modelo era erróneo, la idea de un cambio de fase basada en un cambio de estructura era interesante. Y ¿qué pasaba con la constancia de los ángulos de las ramas de las dendritas de la nieve? Mairan sólo pudo dar a ello una explicación metafísica:

Las partículas de agua que se transforman en hielo tienen tendencia a unirse por sus aristas sensibles según un ángulo de 60° , o de 120° que es su suplemento ²¹.

¹⁹ Mairan, p. 155.

²⁰ Mairan, p. 158.

²¹ Mairan, p. 144.

A pesar de las ideas equivocadas, podemos ver la importancia creciente que se daba a la necesidad de explicar el cristal, su morfología y su formación, en función de su estructura. La ciencia de los cristales iba, por tanto, entrando lentamente en el camino que habría de llevarla a su triunfo final.

LA CIENCIA DE LOS CRISTALES TOMA UN NOMBRE PROPIO

Está claro que si bien Guglielmini no se refirió a Stensen, las ideas de éste debieron influir en él grandemente. No obstante, no fue en Italia donde Stensen revivió, sino más bien en la vecina Suiza, y en particular en la ciudad de Lucerna donde otro yatroquímico, Maurice Cappeller (1685-1769), iba a ampliar las ideas del gran fundador. La obra de Cappeller tiene importancia no sólo por constituir una ampliación de las ideas de Guglielmini, sino porque fue el primero en dar el nombre de cristalografía al estudio de los cristales, nombre que incluyó en el título de su libro, *Prodromus crystallographiae de crystallis improprie sic dictis commentarium*²².

La obra de Cappeller era, en realidad, una clasificación de los cristales según su forma exterior. Como yatroquímico que era, Cappeller supuso que los cristales están formados por la agrupación de partículas esféricas de agua, éter y sal. Según él, era la sal, que consideraba como una asociación de sal con un álcali sin forma, la responsable de la forma del cristal, forma que sólo era modificable por el álcali. De acuerdo con estas ideas, supuso que el ácido generaba cristales paralelepípedicos con caras en forma de rombos; que el nitro hacía que los cristales fueran de forma triangular, refiriéndose a lo que se conoce como romboédricos; y que finalmente, el alumbre producía cristales octaédricos. Hasta aquí, Cappeller no hacía más que confirmar las observaciones que Guglielmini hubiera hecho. Pero Cappeller fue más lejos al considerar también la

²² M. A. Cappeller, *Prodromus crystallographiae, de crystallis improprie sic dictis commentarium*, Lucerne, 1723. Trad. alemana por Karl Mileitner, Munich, 1922.

influencia que las condiciones de cristalización tenían en la forma del cristal, condiciones que ya Stensen había señalado.

Como colofón de su trabajo, Cappeller llevó a cabo la primera clasificación de piedras, metales, tierras y sales en función de su morfología. La clasificación de las sales en nueve grupos o tipos morfológicos tiene cierto interés para nuestra ciencia. No sólo aceptó los grupos que Guglielmini había establecido, sino que además de aquellos cuatro tipos, consideró cinco más, a saber, los cristales redondeados, piramidales, prismáticos, poliédricos y dendríticos. Muchas de las observaciones que Cappeller hiciera fueron hechas gracias al microscopio. Por esta razón, este autor hizo hincapié en la necesidad de observar cristales pequeños, pues es en ellos en los que se puede determinar la verdadera morfología de los cristales. La obra estaba ilustrada con cuarenta dibujos de cristales, constituyendo, por tanto, el primer caso después de Stensen en que se dio la importancia que tenía a la representación de los cristales.

La obra de Cappeller adquirió en seguida aceptación general, y como consecuencia de ello su autor fue elegido miembro de la Royal Society de Londres en 1726, tres años después de la publicación de su *Cristalografía*. El interés de su obra no reside solamente en constituir la primera clasificación cristalográfica de los sólidos, sino en que Cappeller mantuvo que el estudio de esta morfología del cristal, que él creía derivaba de la ordenada agrupación de las últimas partículas que lo forman, aportaría luz en el entendimiento de la composición de la materia, intuición que el tiempo habría de corroborar. La principal dificultad que Cappeller y otros después de él, encontraron residía en el hecho de que la morfología del cristal no es una propiedad constante, de tal forma que la morfología de una sustancia dada puede variar.

LA REACCIÓN

Esta variedad de la forma externa del cristal constituyó, en efecto, uno de los factores que impidieron el empleo de técnicas cristalográficas en ramas de tanto interés como la química y la

mineralogía. Por ejemplo, Stahl (1660-1734), un prominente químico alemán, se expresaba a este respecto de la siguiente manera:

En general, con la excepción de su identificación externa, la forma de las sales no me parece tener utilidad alguna; éste es el motivo por lo que dejo a otros que hagan descubrimientos de este estilo ²³.

Esta aversión a interpretar lo cristalizado no impidió a Stahl utilizar como operación química el proceso de cristalización fraccionada, que describió con detalle, tomando como ejemplo el caso de la sal común y el nitro. La utilización de este proceso nos indica cómo la química se estaba convirtiendo en una fuente de cristales, diferentes de los naturales, que poseían la gran ventaja de poder controlar la manera de producirlos.

La actitud de Stahl no era excepcional, sino que más bien representaba una idea muy extendida entre los hombres de ciencia del XVIII. A este respecto baste citar unas frases del Conde de Buffon, que decía:

La forma de cristalización no es una constante característica, sino más bien la característica más engañosa por la cual un mineral puede ser identificado.

Todo el trabajo de los cristalógrafos sirve sólo para demostrar que existe variedad en todo donde ellos suponen uniformidad... (demostrando) que en la naturaleza no hay nada absoluto, nada perfectamente regular ²⁴.

Esta actitud negativa acerca del valor de lo cristalizado explica también el período de inactividad, o mejor la falta de productividad de este campo durante casi todo el siglo XVIII. No obstante, ello no impidió que se reconociera que los minerales poseían una morfología dada y que, por consiguiente, esta morfología constituía un carácter de extrema utilidad en la determinación de la especie mineral. Este hecho fue reconocido al desarrollarse la mineralogía sistemática, especialmente en la utilización de lo que en aquel tiempo se

²³ George Ernest Stahl, *Traité des seis*, París, 1771, p. 284.

²⁴ George Lectère, Comte de Buffon, *Histoire naturelle des minéraux* (5 vols.), París, 1783-1788, vol. 3, p. 433.

denominaron caracteres externos de los minerales. Pero antes de pasar a este punto, vale la pena traer aquí otra contribución importante para nuestro relato.

OTRA VEZ EL EMPAQUETADO DE ESFERAS

La ciencia de los cristales, como toda otra ciencia, tiene sus héroes olvidados, héroes que han sido descubiertos y apreciados sólo pasado largo tiempo después de su muerte. Uno de estos casos es el de Mikhail Vasilievich Lomonosov (1711-1765). Mikhail Vasilievich era el hijo de un rico pescador de los mares del norte. Nacido en Deniovka, cerca de Archangel, abandonó su casa a los diecisiete años de edad para dedicarse a su afición: estudiar. Haciéndose pasar por hijo de un noble fue admitido en la escuela; en vista de los progresos que el muchacho hacía fue enviado a San Petersburgo y después a la Universidad de Marburg, en Alemania, donde estudió química. A su regreso a la capital rusa Mikhail Vasilievich fue nombrado en 1745 profesor de química de la Universidad.

Lomonosov era un hombre universal, que no sólo floreció en ciencias, sino que escribió la primera gramática rusa, escribió poemas y dramas, por lo que se le considera como el padre de la literatura rusa, y jugó un papel importante en la fundación de la Universidad de Moscú, Universidad que hoy lleva su nombre. En ciencias, Lomonosov mantuvo ideas antiflogísticas, creía que el calor era un movimiento de las moléculas, y en la teoría ondulatoria de la luz. Su contribución en el campo de la mineralogía es particularmente oportuna para nuestro propósito. En 1745 Lomonosov había publicado para la Academia de Ciencias de San Petersburgo un voluminoso catálogo de 227 páginas con la descripción de 3030 minerales que figuraban en la colección de la Academia. La publicación de este catálogo, por sí solo, merecería traer a estas páginas la figura de su autor. En realidad, su importancia reside más en lo que no publicó, que en lo que vio la luz de la imprenta.

Entre las sustancias de interés estratégico, como hoy diríamos, el nitró ocupaba a mediados del siglo XVIII una posición especial, debido a que entraba en la composición de la pólvora. En las páginas

anteriores hemos visto cómo Guglielmini primero y Cappeller después se interesaron en la morfología de esta sal. El interés científico del problema crecía, y la Academia Prusiana de Ciencias de Berlín juzgó oportuno en 1748 convocar un concurso público para premiar la mejor memoria que explicase el origen del nitro y sus propiedades. Lomonosov, que mantenía estrechas relaciones como miembro de la Academia de San Petersburgo con las demás instituciones europeas del mismo estilo, tuvo conocimiento de este concurso, y preparó diligentemente una memoria titulada *Sobre el origen y naturaleza del nitro*²⁵, Lomonosov no se llevó el premio, pero el contenido de su memoria es de interés para nuestro campo.

Lomonosov indicó en dicha memoria que la ley de la constancia de los ángulos podía explicarse utilizando el modelo de un empaquetado de bolas. Pero dejemos a su autor expresarse:

Las partículas de nitro -decía Lomonosov- si las considerarnos esféricas o suponemos que ésta es la forma que los cuerpos naturales pequeños (es decir, los átomos) adoptan cuando se juntan, nos permiten explicar de manera muy sencilla por qué el nitro forma cristales sexangulares. Es cierto que todo esto es simple especulación, pero de todas formas responde perfectamente a la naturaleza de los componentes del nitro, independientemente de su naturaleza.

Lomonosov, a seguido, pasa a describir el empaquetado de bolas:

Supongamos -decía- que seis corpúsculos se distribuyen de tal manera que las líneas que unen sus centros forman triángulos equiláteros; al final obtendremos una figura limitada por seis líneas rectas, semejante a los

²⁵ Esta memoria fue descubierta al principio del siglo xx por el químico ruso D. Menchoutkine. Para más detalles, ver M. Chaskolskaia, *Les Cristaux*, éditions en langues étrangères. Moscou. 1959, pp., especialmente, pp. 157-162 y 211-212.

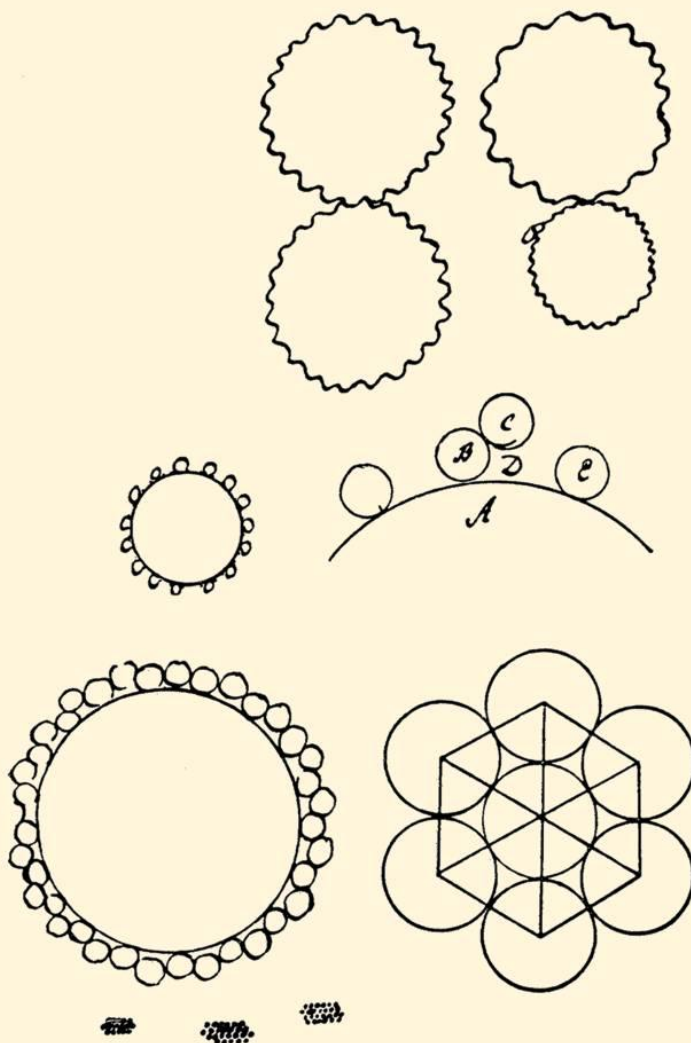


FIG. 22.- *La cohesión mecánica de los átomos de Lomonosov*

prismas del nitro. Las partículas de nitro agrupadas de esta manera en un número casi infinito, forman los prismas cristalinos del nitro, cuyas caras pueden ser a veces irregulares, pero siempre paralelas y de acuerdo con la hipótesis aquí introducida. Esta hipótesis queda confirmada por las tres razones siguientes: 1) esta explicación no supone que la forma de las partículas sea la misma que la del cristal, y la cuestión no queda sin explicación, como frecuentemente ocurre; 2) los ángulos cristalinos del nitro coinciden con los de la distribución de partículas, es decir, los 120° ; 3) nuestra hipótesis nos permite explicar de manera sencilla la forma de otros cristales, por ejemplo, la forma cúbica de los cristales de sal de roca suponiendo que las partículas se agrupan de tal manera que las líneas que unen sus centros forman cuadrados.

Estas citas demuestran cuán persistente era la idea de una distribución regular de partículas esféricas entre los que estudiaban los cristales y buscaban una explicación a su forma. Lomonosov no redujo su interés por lo cristalizado a esta memoria: en realidad, en su obra *Las Capas Terrestres*, publicada en 1763, no sólo describió la morfología de minerales cristalizados, sino que midió sus ángulos. Impregnado como estaba de estas ideas, y convencido de la utilidad del estudio de la morfología cristalina, urgía a «estudiar de manera completa la morfología de los cristales y medir sus ángulos». A pesar de que sus ideas indicaban claramente el camino a seguir, sus trabajos al ser publicados en ruso, quedaron relegados en una Rusia donde una muralla de ignorancia y rutina impidieron su florecimiento. Todavía se habría de esperar un siglo largo para que la ciencia de la cristalografía cobrara impulso e importancia en aquellas tierras.

MINERALOGISTAS Y GABINETES MINERALÓGICOS

La colección de minerales cuyo catálogo escribió Lomonosov era una de tantas que se habían formado por esta época en Europa. En efecto, la costumbre de coleccionar minerales se extendió por Europa, debido probablemente a la idea de imitar una costumbre que en Francia y especialmente en París constituía una verdadera moda. Como indicación de la importancia de este hecho nuevo en la ciencia

se sabe que en París existían en 1742 diecisiete gabinetes de Historia Natural, número que creció a veintiuno en 1757, y a sesenta y uno en 1780. Fue una moda que se extendió entre la aristocracia, como lo acreditan los inventarios de los efectos personales de los emigrantes que abandonaron Francia como consecuencia de la Revolución Francesa. En general estas colecciones estaban lejos de ser colecciones realmente científicas, pues los materiales que almacenaban representaban más bien curiosidades que material de estudio. Por otra parte, la mayor parte de ellas estaban pobremente clasificadas. Con todo, su existencia proporcionó al aficionado primero y al perito después una abundancia de material como nunca había existido antes, contribuyendo de esta manera a crear el ambiente necesario para transformar una curiosidad en una rama científica, ayudando incluso a fraguar la nueva terminología de la ciencia. Así, por ejemplo, la palabra macla («macle» en francés) se originó como resultado de una de estas colecciones. Cristophe-Paul Cautron de Robien poseía en la suya un mineral, la andalucita, cuyos cristales tienen la forma de cruz. Estos cristales contienen a su vez inclusiones de carbón (grafito) orientado en forma regular y bien visible, que da al conjunto el aspecto de un campo de Losanges tal como se ve en el escudo de la casa de Rohan. Inducido por esta semejanza, Robien dio el nombre de macla al cristal, nombre que después se ha adoptado como indicativo de dos o más cristales de la misma especie unidos según una cierta ley de simetría.

La abundancia del material acumulado y lo numeroso de las colecciones fomentó la aparición del especialista, del técnico que era capaz de poner orden en el material de las colecciones. Por otra parte, aumentaron también las subastas de minerales y de colecciones enteras, siendo frecuente que previamente a dichas subastas se dieran cursos intensivos de mineralogía por expertos. Fue como una bonanza para los que se dedicaban a esta especialidad. El nombre de estos expertos, los mineralogistas, fue introducido por d'Holbach en su artículo *Minerales en la Enciclopedia* que se publicó en 1765. Por otra parte, nuevas condiciones económicas vinieron también en ayuda del estudio de los minerales. Tal fue, por ejemplo, el caso de Suecia, que después de las calamitosas guerras de Carlos XII tuvo una bien ganada paz caracterizada por un rápido desarrollo

económico, en cuyo desarrollo las riquezas minerales que se acaban de descubrir jugaron un papel importante.

LINNEAUS Y LA MORFOLOGÍA CRISTALINA

Debido a todo ello, la necesidad de una clasificación, que siempre existe en toda ciencia descriptiva, se hizo particularmente aguda en el campo de las ciencias naturales, en general, y de la mineralogía, en particular. Esta necesidad fue subsanada por el célebre doctor sueco Carolus Linnaeus (1707-1778) de Uppsala, al publicar su obra *Systema Naturae* ²⁶, primero en forma de tablas en 1735, y tres años después en un *Systema completo* en una serie de volúmenes. Esta obra tuvo un éxito rotundo, llegándose a imprimir en vida de su autor doce ediciones ²⁷, cada una de ellas con mayor cantidad de material. La última edición, la decimotercera fue publicada diez años después de la muerte de Linnaeus, ocurrida el 10 de enero de 1778, como consecuencia de un ataque de corazón.

Aun cuando Linneo es bien conocido entre los naturalistas, vale la pena relatar aquí brevemente su vida, y en especial el origen de la obra que le había de ganar un lugar permanente en la historia de la ciencia. Karl o Carolus Linnaeus nació el 13 de mayo de 1707 en Rohuet (Somoland), Suecia. Siguiendo una antigua tradición sueca, su padre, Niels Ingemarsson, pastor protestante de Stenbrohult, tomó el nombre de Linnaeus, que derivaba de un viejo tilo (Linde) del vecino pueblo de Linnhult. Como hombre de Iglesia que era, su padre deseaba que el joven Carolus siguiera también la carrera eclesiástica, cosa que al parecer no llegó a atraer al joven estudiante, que finalmente se decidió, con gran pesar de su padre, por la medicina, que estudió en la Universidad de Uppsala. Allí tuvo como maestro al naturalista e historiador Olaf Rudbeck, siendo ayudado

²⁶ Caroli Linnaeus, Sueci, Doctoris Medicinae, *Systema Naturae, sive Regna tria naturae Systematice proposita per classes, ordinis, genera et species*, Lugduni Batavorum. Theodorum Haak, 1735. Facsímil por H. H. J. Engel-Ledeboer y H. Engel. Nieuwkoop B. de Graaf, 1964.

²⁷ Carolus Linnaeus, *Systema Naturae*, 12 edición. Homiae, 1768, 3 vols.

económicamente por Olaf Celsius, un profesor de teología que a la sazón estaba escribiendo un libro sobre las plantas citadas en la Biblia. La razón de conceder esta ayuda económica a Carolus fue su decidido interés por la botánica. Fue durante esta época cuando Linnaeus se acreditó como un buen botánico, motivo por el cual, cuando la Sociedad Literario-Científica de Uppsala decidió enviar a una persona a estudiar las tierras de Laponia en 1732 fue Linneo el elegido. Esta expedición que era inicialmente sólo botánica, representó para el joven investigador entrar también en contacto directo con la creciente industria minera del Norte de Suecia. Consecuencia de esta experiencia es encontrarle enseñando mineralogía en la Universidad de Uppsala al año siguiente. Entre 1735 y 1738 Linnaeus estudió en el extranjero, visitando y estudiando, en Alemania, Dinamarca y Holanda. Estos años fueron los mejores para la creación del joven científico. En Holanda publicó su obra *Systema Naturae* a la que nos hemos referido ya y a la cual volveremos con mayor detalle. Una vez publicada esta obra, visitó Londres y París, regresando finalmente a su tierra natal a la edad de treinta y un años. Entusiasmado por la Royal Society de Londres y la Academia de París, Linnaeus fue el promotor de la formación de la Academia Real Sueca de Ciencias, que se constituyó en 1739 con él como primer Presidente. Dos años después era nombrado profesor de Medicina y Botánica de la Universidad de Uppsala, logrando una anhelada estabilidad en su vida. Acreditado como excelente profesor, habiendo restaurado el jardín Botánico de Uppsala, establecido un Museo con sus colecciones y obras, y recompensado por su valor científico entrando en la nobleza, Linnaeus falleció a los setenta años de edad el 10 de enero de 1778; sus restos reposan en la Catedral de Uppsala.

Linnaeus fue ante todo un botánico famoso en su campo. Su *Systema Naturae* era un tratado de ciencias naturales con énfasis en la parte zoológica y botánica; no obstante, notando la necesidad del momento, incluyó en su obra una clasificación de los minerales, que en muchos aspectos era muy inferior a la que él mismo llevó a cabo en su campo de la botánica. Linnaeus no era, con todo, un primerizo en mineralogía, pues su experiencia en el campo se había iniciado algunos años antes cuando visitó la zona de Bergslag. La

clasificación que propuso no era del todo original, no haciendo más que seguir y completar las ideas que Magnus von Bromell había señalado en su *Mineralogía*, publicada en 1730. Bromell basaba la clasificación de los minerales en su comportamiento frente al calor, y tal fue la idea directora que Linnaeus adoptó en su *Systema*. La discusión de su método nos llevaría lejos de la línea que nos hemos trazado para este libro, puesto que implicaría una discusión de la teoría mineral, que sólo nos interesa de manera muy secundaria. Lo que sí vale la pena decir aquí es que Linnaeus siguió el conocimiento aceptado en su época, especialmente lo que la yatroquímica enseñaba. Por consiguiente este autor creía que la sal, o el principio salino, era el responsable de la cristalización y que el agente modificante era el ácido. Lo que sí tiene interés para nuestro relato es el hecho que Linnaeus introdujo la ya obvia forma cristalina como un factor básico en la identificación de un mineral. Esta tendencia es evidente en la sistemática de minerales que pertenecen según Linnaeus al grupo de sal, en cuyo grupo distinguió cuatro especies: el nitro, con cristales con figura *prismática hexaedra* (prismas hexagonales); el muria o sal marina, que tiene forma *tesselata hexaedra* (cúbica); el alumbre, con cristales *tesselata octaédrica* (octaedros); y el vitriolo con cristales *rhomboidea dodecaedra* (romboidales). Desde el primer momento se percató Linnaeus de la importancia que la morfología cristalina tenía como carácter en la identificación de mineral, y consecuentemente, se refirió a *fragmentis angulatis* al citar el cuarzo y sus variedades; y a *tessulatis contiguis* cuando describe la morfología de la galena; y a *polyedron regulare* al referirse al granate. Cuando pasa a la parte sistemática, Linnaeus hace distinción en la morfología cristalina al citar el número de caras y aristas de un cristal, así como al describir la forma geométrica de las caras, explicando la morfología resultante mediante la aparición de truncaduras de vértices y aristas.

A pesar de su esfuerzo, y a pesar de que la forma cristalina es, en efecto, un carácter fundamental para la clasificación de los minerales, la idea de Linnaeus era prematura, puesto que la cristalografía era todavía incipiente y carecía aún de un cuerpo de doctrina. No hay que extrañarse, por consiguiente, que su punto de vista fuera criticado vivamente por la mayor parte de los químicos de su tiempo. A pesar de estas críticas, Linnaeus incorporó en las sucesivas

ediciones de su *Systema Naturae* más y más dibujos de formas cristalinas, hecho que no podía dejar de llamar la atención de los coleccionistas de minerales que se preocupaban cada vez más por un carácter tan llamativo como su forma externa.

WERNER Y LOS CARACTERES EXTERNOS DE LOS MINERALES

Si la obra de Linnaeus introdujo orden en el campo de la sistemática en las ciencias naturales, fue en realidad la obra de Werner (1750-1817) la que afectó profundamente la dirección que la mineralogía había de tomar a finales del siglo XVIII y principios del XIX.

Abraham Gottlob Werner nació el 25 de septiembre de 1750; al ser su padre Inspector de Minas, puede decirse que Werner estuvo sumergido como quizás ningún otro mineralogista, en minerales desde el propio inicio de su vida, minerales que utilizó incluso en sus juegos infantiles. A los cinco años aprendió a leer y escribir, leyendo ya en esa temprana edad libros de mineralogía. Su interés por los minerales y las técnicas metalúrgicas fue creciendo con la edad, no sólo en la escuela sino después. Fue admitido en 1770 como miembro de la Sociedad Económica de Leipzig. Un año después entró en la Universidad de Leipzig, donde por dos años estudió leyes, que después abandonaría para dedicarse a filosofía, idiomas modernos y sobre todo a mineralogía. A este interés ayudaron, no sólo la inclinación heredada del hogar paterno, sino, en gran manera, las actividades de la Sociedad Económica de Leipzig, donde se celebraban conferencias científicas de psicología, astronomía y mineralogía. La presencia del hermano de J. K. Gehler parece ser también de interés, puesto que J. K. Gehler había escrito en 1757 una obra titulada *The characteribus externis*, obra que impresionó mucho al joven Werner. Tanto fue así, que Werner empezó a traducir dicha obra del latín al alemán. Según parece, un amigo suyo J. E. Kapp instigó a Werner a que en vez de traducir la obra, escribiese directamente una con sus propias ideas. De acuerdo con estos consejos, Werner a principio de 1773, empezó a preparar el manuscrito, que fue terminado a finales de año. La obra *Von den*

auusserlichen Kennzeichen der Fossilien ²⁸ fue publicada en Leipzig. Werner tenía entonces veinticinco años. La obra tuvo un considerable impacto entre los mineralogistas de la época, y hoy en día se considera como el primer libro de texto de mineralogía moderna. A ello ha contribuido sin duda alguna, no sólo la claridad de sus ideas y sistematización de conceptos, sino, en gran manera, la idea rectora de la obra, es decir, que «los minerales deben ser clasificados y las especies separadas basándose en su composición química», ayudándose de los caracteres sensibles, entre los que la forma cristalina jugaba un papel importante. De esta forma, la nueva ciencia de la *Origtognosia* fue fundada.

Poco después de publicar su obra, Werner fue nombrado en 1775 profesor de minería y mineralogía en la Bergakademie de Freiburg, institución, que con él, se transformaría en uno de los centros más famosos de esta ciencia a finales del XVIII, atrayendo numerosos estudiosos que se trasladaban allí para escuchar las claras lecciones del maestro.

En lo que a nuestra ciencia interesa, la obra de Werner merece ser considerada por la utilización que hizo de la morfología cristalina. Distinguía Werner seis formas primarias de los cristales; icosaedro, hexaedro, prisma, pirámide, tabla y lente. Según él las formas primarias en el cristal estaban formadas por una clase o a lo más dos clases de planos, a saber, planos laterales y planos terminales; y por otra parte, las formas del cristal, es decir, las formas prismáticas, piramidal y tabular constaban de un número variable de caras.

Preocupado por una mineralogía meramente descriptiva, Werner consideró el aspecto matemático de la cristalografía como una doctrina superflua, lo que explica muchas de las inconsistencias que se observa en su obra. A pesar de todo, debemos hacer hincapié en el lado positivo de su contribución, puesto que con él se incorpora, de forma definitiva, el carácter geométrico de los cristales en la descripción de los minerales.

²⁸ A. G. Werner, *On the external characters oi minerals*, trad. Albert V. Carozzi, Univ. of Illinois Press, Urbana, 1962, XV + 118 pp.

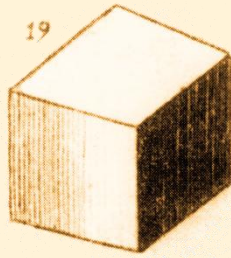
En la descripción de la morfología cristalina Werner siguió lo que Linnaeus había ya dicho, lo que explica defectos adicionales en su obra. Entre las ideas que tomó de aquel autor figuran las modificaciones de una forma primaria, que Werner redujo a tres operaciones básicas, a saber, truncadura, biselamiento y apuntamiento. Por truncadura entendía la sustitución por caras de todos o parte de los vértices de una forma primaria; por el biselamiento entendía la sustitución de una arista por dos caras menores y convergentes, mientras que la sustitución de un vértice por un conjunto de caras menores era para Werner el apuntamiento.

La operación de truncadura nos la explica Werner con todo detalle en lo que sigue:

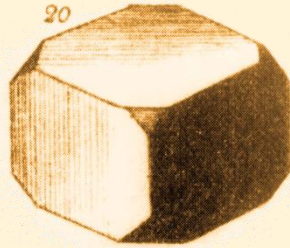
Unos cuantos ejemplos ilustrarán este asunto: la galena posee cinco tipos de cristales que pasan de un cubo perfecto a una pirámide doble tetragonal (lo que hoy se conoce como octaedro). El cubo perfecto es la primera forma cristalina, cuando sus vértices están ligeramente truncados obtenemos la segunda forma cristalina. Cuando la truncadura de los vértices se lleva hasta tal extremo que sus lados son tan grandes que se cortan, se obtiene el tercer tipo de cristales. Esta forma constituye la transición del cubo a la pirámide doble tetragonal y puede considerarse también un octaedro truncado o un cubo truncado. Llevando esta truncadura más lejos, obtenemos el cuarto tipo de cristal de galena, que es una pirámide doble tetragonal con vértices truncados, porque los lados truncados del cubo se han convertido en realidad en las caras del octaedro. Por el contrario, las caras primarias del cubo se han convertido gradualmente en un octaedro. Si continuamos la truncadura todavía más allá, el octaedro deja de ser truncado, con lo que obtenemos el quinto tipo de cristal de galena, que en realidad es un octaedro perfecto, en el cual las caras del cubo han desaparecido completamente y sólo quedan los planos truncantes, que ahora forman los planos primarios del octaedro. También podemos considerar la transición al cubo perfecto a través de las otras tres formas cristalinas ²⁹.

Como ilustración de esta serie de transformaciones Werner, en una nota aclaratoria, utilizó las formas cristalinas que aparecen en el Vol. III del *Systema Naturae* de Linnaeus. Esta nota dice textualmente:

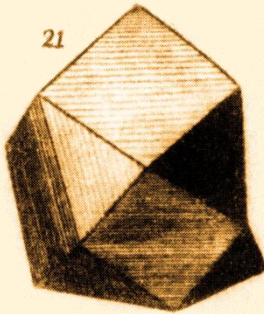
²⁹ Werner, pp. 64 y 65.



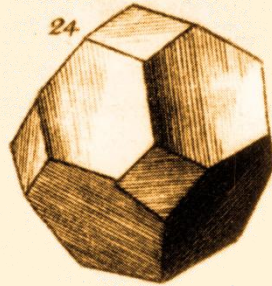
a



b



c



d

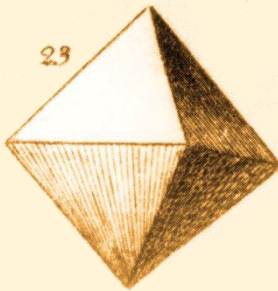


FIG. 20.- *Las figuras de Linneo que Werner utilizó para ilustrar la truncadura de los cristales.*

Systema Naturae de Linnaeus, Tomo III, en el cual la figura 19 representa un cristal de primer tipo; la 20, que corresponde al tipo segundo; la 21, al tercero; la 24 al cuarto y la 23 al quinto ³⁰.

A pesar de que Werner utilizó estos conceptos, en realidad se le escapó su verdadero sentido, que pronto había de ser reconocido en su verdadero valor por la escuela cristalográfica francesa que en aquella época se estaban desarrollando en Francia, y que estudiaremos más adelante.

EL EXTRAÑO COMPORTAMIENTO DE LA TURMALINA

La Naturaleza es un tesoro inagotable de hechos maravilloso. A cada paso que damos en su investigación nos descubre a nuestra mirada nuevos paisajes. Cada vez que uno se imagina haber alcanzado el fin de algún problema, un examen más atento muestra que el final que creíamos haber alcanzado está todavía infinitamente alejado de nosotros, y lo que nos ha hecho creer que el camino era corto son nuestros sentidos demasiado débiles para percibir el final ³¹.

Con estas palabras, un físico alemán, Franz Ulbrich Theodor Hoch (1724-1802) mejor conocido con el nombre latinizado de Aepinus iniciaba la descripción de uno de los descubrimientos más interesantes de la física de los cristales. El descubrimiento lo realizó Aepinus en Rusia, donde, como tantos otros científicos de altura, como Euler, Bernouilli y otros, trataba de elevar el nivel científico del país, de acuerdo con la invitación de los Zares. Lo que Aepinus había estudiado era el extraño comportamiento de la turmalina frente al calor.

³⁰ Werner. p. 65.

³¹ F. Aepinus, *Mémoire concernant quelques nouvelles expériences électriques remarquables*. Histoire de l'Académie Royale des Sciences et Belles Lettres de Berlin, 12 (1756), 105-121.

Una relación de estos trabajos se encuentra también en Joseph Priestley, *The history and present state of electricity*, 3rd. edition. London, 1755. Reprint por Robert E. Schoefield, *The Sources of Science*, núm. 18. Johnson Reprint Corporation, New York, 1966, vol. I, pp. 367-380.

La turmalina es una gema bien cristalizada, de forma prismática y con un atractivo color pardo o verde oscuro. Las de mejor calidad provienen de la isla de Ceilán y de las Indias Orientales. La gema era bien conocida por los marinos y mercaderes holandeses, que le dieron el nombre de *aschentrekker*, es decir, que atrae las cenizas. Esta propiedad, la de atraer las cenizas al calentarla, es precisamente, lo que hacía a la turmalina diferente de los demás minerales. Ya en 1707, Nicolás Lemery (1645-1715) había comunicado esta extraña propiedad a la Academia Real de París, pero este curioso comportamiento pronto se olvidó, hasta que, unos cuarenta años más tarde, Aepinus, a quien un tal Sr. Lechman le había dado dos ejemplares del raro mineral, llevara a cabo sus célebres experimentos, que se publicaron en la *Histoire de la Academia de Ciencias y Bellas Artes de Berlín* en 1756.

Aepinus observó que, cuando se calienta un cristal de turmalina uno de sus extremos desarrolla una carga eléctrica positiva, mientras que el extremo contrario lo hace con electricidad negativa. Con el fin de estar seguro que el fenómeno se debía sólo al hecho de calentar, Aepinus hizo una serie de experimentos, que él mismo relata de la siguiente manera:

Si se pone la turmalina sobre un metal calentado, sobre una placa de vidrio, o sobre una brasa, se hace eléctrica al calentarse, y esto se observa independientemente de cómo se haga el experimento y de qué lado se ponga la piedra sobre la placa caliente ³².

También observó que al enfriarse, la electricidad de sus extremos cambiaba de signo. Aepinus llamó extremo positivo a la parte del cristal que desarrolla una carga positiva al sufrir un cambio positivo en la temperatura, mientras que al extremo contrario lo denominó polo negativo.

Los experimentos de Aepinus inmediatamente llamaron la atención del mundo científico, pues el momento histórico en la física pertenecía a la electricidad. En efecto, hacía pocos años que Jean Theophile Desaguliers (1683-1744) había descubierto que se podía

³² Aepinus, p. 109.

producir carga eléctrica por inducción, cuando lo que se creía que sólo se podía producir por frotamiento. Precisamente entre 1733 y 1734, Charles-François du Fay (1698-1739), superintendente de los Jardines del Rey de Francia, había distinguido dos tipos de electricidad, resinosa y vítrea; poco después, en 1745, la botella de Leyden era inventada por Pieter van Musschembroek (1692-1761), Profesor de Leyden. Recordemos, finalmente que en 1751 Peter Collison había publicado el célebre *Experiments and Observations in Electricity made at Philadelphia in America*, donde se recogían los trabajos pioneros de Benjamín Franklin (1706-1790), que introducía la nomenclatura más cómoda de electricidad positiva y negativa, que correspondían a la vítrea y resinosa, respectivamente.

La turmalina -había dicho Aepinus- es doblemente digna de atención porque sin frotarla, y simplemente al calentarla, hace aparecer una considerable electricidad ³³.

Los experimentos de Aepinus fueron prontamente continuados por el astrónomo y físico inglés John Canton (1718-1772), que había explicado la inducción eléctrica como producido por efluvios eléctricos. Fue precisamente Canton el que explícitamente indicó que el efecto eléctrico observado en la turmalina se producía «durante el tiempo completo del aumento o disminución del calor», así como la aparición de las cargas positivas y negativas en ambos extremos del cristal no venía condicionada por la forma del pedazo de cristal, sino por su orientación con respecto del cristal total.

Bien pronto, el extraño comportamiento de la turmalina dejó de ser tan extraño. El propio Canton encontró que el topacio del Brasil se comportaba de manera análoga, hallazgo que fue confirmado por otro astrónomo inglés, Benjamín Wilson (1741- 1793) ³⁴, que había mantenido una polémica con Aepinus a tenor del problema de la turmalina. Wilson confirmó las observaciones de Canton según las

³³ Aepinus, p. 107.

³⁴ Benjamin Wilson, «Observations upon some gems similar to the tourmalin», *Phil. Trans.*, 52 (1762), 443-447.

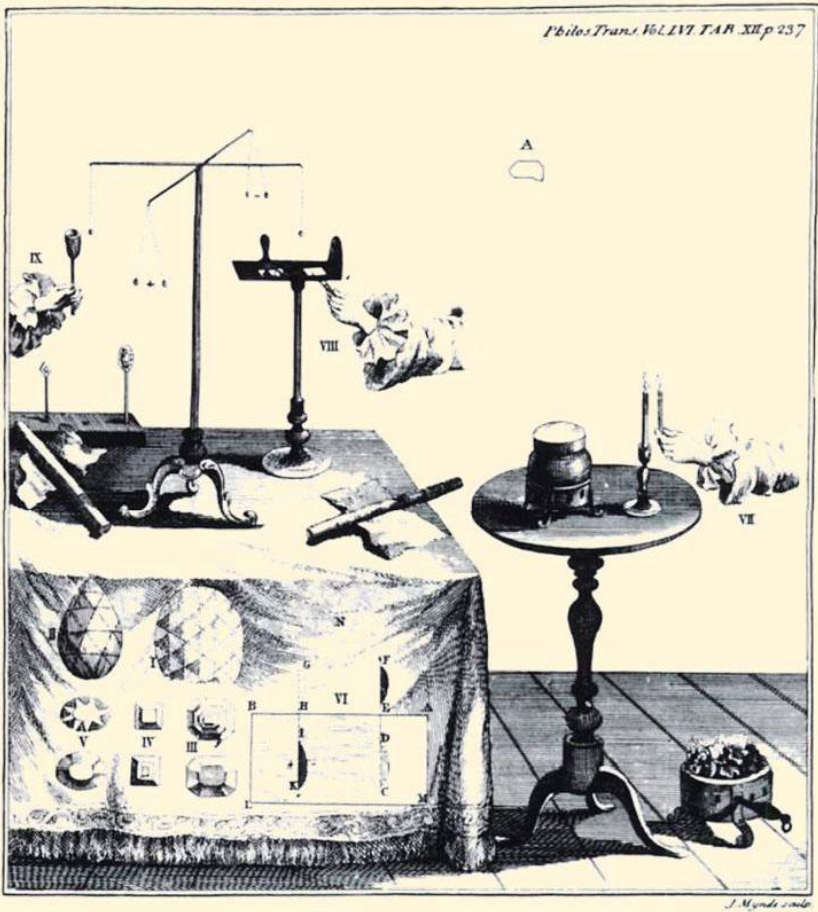


FIG. 19.- *El experimento de la turmalina, según Bergman.*

cuales las cargas (que el autor las interpretaba como «dirección del fluido eléctrico»), no dependían de la forma externa de la gema «si no de alguna manera o constitución interna especial», indicando que «la dirección del fluido eléctrico que se mueve en su interior es siempre a lo largo de grano o alargamiento del cristal, un extremo electrificándose más y el otro menos»³⁵.

Habiendo confirmado la observación de Canton de que sólo se producía electricidad al calentar o enfriar, y teniendo en cuenta que el aumento o disminución de temperatura produce expansión o contracción en el cristal, Wilson llegó a la conclusión de que «debe existir algún poder perteneciente a la piedra, que viene afectado de manera diferente por tal contracción y dilatación»³⁶.

Es decir, la propiedad debía ser una consecuencia de la estructura del cristal. El comportamiento de la turmalina presentaba nuevamente en la historia de la ciencia de los cristales una propiedad física que era específica de los mismos, y que esta propiedad estaba ligada indisolublemente con la orientación intrínseca del cristal, es decir, con su simetría. De esta manera, la física cristalina se enriqueció con nuevos hechos y con conceptos que iban a desarrollarse en la siguiente centuria.

LA CRISTALOGRAFÍA SE HACE CIENCIA: ROMÉ DE L'ISLE

Entre los coleccionistas que pululaban en París, el español Francisco Dávila tiene especial interés para nosotros³⁷. Dávila, que vivió en París unos veinte años, había formado una valiosa colección de objetos curiosos entre los cuales se encontraba una bien nutrida colección de minerales. La colección fue finalmente trasladada a

³⁵ *Idem*, p. 445.

³⁶ A letter from Mr. B. Wilson, F. R. S. and Member of the Royal Academy of Sciences at Upsal, to Mr. Aepinus, Professor of Natural Philosophy in the Imperial Academy of Science at St. Petersburg, and member of the Academies of Berlin, Stockholm and Erfurth. *Phil. Trans.*, 53 (1763), 436-466.

³⁷ J. L. Amorós, «La colección del caballero Francisco Dávila y el origen del Real Gabinete de Historia Natural». *Bol. R. Soc. Española His. Natural* (G). 61(1963). 9-37.

Madrid donde se había fundado el Real Gabinete de Historia Natural, y Dávila fue designado en 1771 su primer Director. El Gabinete, con el devenir del tiempo se transformó en el Museo Nacional de Ciencias Naturales, institución que ha tenido gran influencia en el desarrollo de la mineralogía en España. La razón de traer aquí este asunto no es la influencia de Dávila y su colección en el desarrollo de la ciencia de los cristales en España, sino más bien porque el catálogo de su colección, publicado en París en 1767, constituyó una de las obras importantes de un personaje que iba a transformar la cristalografía en una ciencia. Este personaje era Romé de l'Isle.

La figura de Romé de l'Isle (1736-1790) fue, a pesar de su importancia, en cierto modo trágica. Jean Baptiste Louis de Romé fue el hijo natural de un alférez del regimiento de caballería Candé, que durante su servicio en la guarnición de Gray conoció a la que iba a ser la madre. Jean Baptiste terminó sus estudios de humanidades en París al principio de la guerra de los siete años. Ya por aquella época, el joven Romé tenía interés por la mineralogía, a la que se dedicaba siempre que tenía una oportunidad. Con la esperanza de poder hacer carrera en la marina mercante, se enroló en la Compañía de las Indias con el nombre de J. B. L. Delisle, nombre por el que iba a ser conocido en el futuro. Como indicación del interés que Delisle mostró siempre por la mineralogía cabe citar que en su viaje al Brasil a bordo del «Bien Aimé» aprovechó una escala en Río de Janeiro para recoger ejemplares de mica dorada. Enrolado en la marina de guerra, Delisle participó en la batalla naval de 1758 contra los ingleses, en aguas de la India. Perdido el buque en que peleaba, fue desembarcado en Pondicheri donde permaneció hasta enero de 1761, en que fue hecho prisionero por los ingleses, siendo devuelto al fin de las hostilidades en 1764 a Francia, no sin antes haber pasado por varias localidades indonesias. Todos estos avatares bélicos no impidieron al ávido mineralogista coleccionar todo lo que caía en su poder, especialmente oropimente de Coromandel.

En París, Delisle conoció a Baltasar-George Sage, un científico de poca monta pero bien introducido en el mundillo aristocrático. Gracias a él, Delisle, conoció a Dávila, logró un empleo, y lo que era más importante aún, logró nuevos conocimientos que le permitieron

seguir clasificando colecciones mineralógicas y editar sus catálogos. Delisle era ya un perito bien conocido en la materia cuando publicó en 1772 su *Essai de cristallographie*³⁸, que le haría célebre. Este ensayo, en un volumen, transformaba el interés curioso de la forma cristalina en una ciencia propia, la Cristalografía. No obstante, la importancia del hecho no fue acompañado por un cambio en la mentalidad del mentidero científico de París que se empeñaba en considerar a Delisle como un perito, pero no como un científico. Así, por ejemplo, la Académie des Sciences de París prefirió aceptar en su seno en diciembre de 1772, al farmacéutico Antoine Baumé, negando siempre la entrada a Delisle, debido a rencillas personales.

Delisle no cejó a pesar de todo, y si su *Essai de cristallographie* había sido importante, su segunda obra *Cristallographie, ou description de formes propres a tous les corps de regne mineral*, publicada en París en 1783 en cuatro volúmenes fue definitiva. Pero ni con estos méritos logró entrar en la Academia. La excusa era que no se le considera como científico serio y como muestra se citaban sus catálogos. Pero la razón era más profunda. Delisle había tenido el coraje de criticar a Buffon y a Baily, y posteriormente entre Haüy y él había surgido un gran problema de personalidades. Si Francia, su tierra natal, le negaba el reconocimiento debido, las Academias de Estocolmo, Mainz y Berlín se la brindaron, y luego, el mundo de los cristalógrafos ha seguido reconociéndolo de forma imperecedera.

LA CRISTALOGRAFÍA COMO CIENCIA

Como hemos dicho, las dos obras de Delisle fundaron la nueva ciencia. Era necesario, ante todo, garantizar su importancia probando que el estudio de los cristales había interesado a personalidades pasadas y contemporáneas. Con esta idea en mente, Delisle incluyó primero en su *Essai*, y luego en su *Cristallographie*, una importante lista de autoridades. Así, en su *Essai* la lista la

³⁸ M. de Romé Delisle, *Essai de cristallographie, ou description des figures géométriques, propres a différent corps du régime mineral, connus vulgairement sous le nom de cristaux*, París, Didot, Knapen et Delaguette, 1772, XXXII + 381 pp.

comprendía 96 autores distintos, muchos de ellos con más de un trabajo o libro. Como históricamente esta lista es importante, la transcribimos aquí con la ortografía usada por Delisle:

Agrícola, Aldovande, Alischer, Baker, Bartholin, Bertrand, Besler, Boece de Boot, Boerhaave, Bonanni, Borlace, Bourguet, Boyle, Bruckmann, Bulkeley, Cappeller, Cardan, Cartheuser, Costa, Cronstedt, D'Arcet, Dávila, Encelius, Engestrom, Foley, Franci de Franckenau, Gahrlied, Geoffroy, Gesner, Gimma, Gorraeus, Guglielmini, Hagendorn, Hebenstreit, Henckel, Hill, Hire, Homberg, Hottinger, Imperati, Juncker, Justi, Kohler, Kentmann, Kircher, Konigh, Kundmann, Lachmund, Laet, Lana, Lang, Leeuwenhoeck, Lehman, Linné, Lister, Lunchtmans, Luid o Liyud, Macquer, Mercati, Molyneux, Monti, Myl, Nadault, Parson, Petit, Pignori, Pline, Pott, Ray, Robien, Robinet, Rouelle, Rumphius, Sachs, Sage, Scheuchzer, Schlosser, Septala, Sibbald, Simler, Spener, Stahl, Stenon, Theophraste, Tiling, Trembley, Valentini, Velsch, Vogel, Volksmanns, Wallerius, Wolarst, Koltersdoff, Wormius, Wurffibain, Zimmermann.

La lista claramente indica la preocupación que Delisle tenía por la morfología del cristal, y su despreocupación por las propiedades físicas, tal como resulta al faltar en la lista tanto Newton como Huygens. Que conoció la birrefringencia es obvio, pues la cita al hablar de la calcita, y la inclusión de Bartholino es indicativa. Para nosotros tiene también mucho interés que en la lista se encuentre Steno, al cual se refiere ampliamente, especialmente en el capítulo del cuarzo. Este conocimiento de la obra del genial danés es doblemente importante en este caso, pues Delisle, como veremos, redescubrió la ley de la constancia de los ángulos diedros.

No podía faltar en Delisle la necesidad de probar que esta nueva, ciencia había sido ya iniciada por la mayor autoridad científica de su tiempo. En efecto, el gran sistemático de la época, Carl von Linnaeus había estudiado cristales y de él iba a recoger la idea de las truncaduras y biselamientos. La referencia a Linnaeus era necesaria, en la mente de Delisle, para conferir respeto a la nueva ciencia.

Si existían autoridades, y prestigiosas las más de ellas, ahora sólo le faltaba a Delisle definir la nueva ciencia. Y así lo hizo:

Cristalografía -decía Delisle- tiene como contenido el conocimiento de las formas que corresponden a todos los cuerpos del reino mineral. Estas formas son el resultado de la combinación de principios elementales que por su sencillez y su solidez son invariables e indestructibles ³⁹.

Si la nueva ciencia tenía un contenido propio, debía existir también un sujeto del cual se obtuviera la información que constituía el contenido de la ciencia. Este sujeto era, evidentemente, el cristal, que Delisle definió como sigue:

Cristales son todos los cuerpos del reino mineral, que tienen forma poliédrica y geométrica, formada por caras planas y que forman determinados ángulos ⁴⁰.

LEYES O PRINCIPIOS DE LA CRISTALOGRAFÍA

Aparte del contenido y del objeto de la nueva ciencia, ésta debía contener ciertos principios generales o leyes que expresaran las verdades deducidas del estudio de los cristales. La primera de dichas leyes era para Delisle la existencia de cristales:

una ley fundamental de la naturaleza según la cual las partes integrantes de un cuerpo, mutuamente separadas por interposición de un fluido, quedan forzadas a agruparse y formar masas sólidas de forma regular y constante⁴¹.

Hemos visto a lo largo de las páginas que preceden, cómo esta ley de la naturaleza fue tomando forma a lo largo del XVII y del XVIII. Fue precisamente el hecho de existir cristales de forma constante, o al menos reconocibles, lo que hizo posible que se desarrollara una ciencia de los cristales. Delisle, al fundar la cristalografía, no podía menos que reconocer este hecho y plasmarlo en una ley fundamental de la naturaleza.

³⁹ Delisle, *Cristallographie*, Introducción.

⁴⁰ Delisle, *Essai*, p. 5.

⁴¹ *Idem*, p. 5.

El segundo principio sobre el cual Delisle fundaba su ciencia fue el principio de la constancia de los ángulos, intuitivo por Steno, pero expresado explícitamente por Delisle de la siguiente manera:

(los cristales) tienen su forma poliédrica o geométrica más o menos perfecta, pero cuyos ángulos mantienen unos valores constantes y determinados en cada especie ⁴².

Este principio fue explícitamente enunciado en su *Cristallographie*, pero no en su *Essai*. La razón de ello estriba en que precisamente entre la edición de ambas obras fue cuando Delisle «descubrió» la ley. A pesar de que la historia del descubrimiento ha sido relatada numerosas veces, y en especial por Daumas ⁴³, debido a la gran importancia que tiene para nuestra ciencia, daremos aquí un breve resumen de la misma.

Delisle estaba preparando en 1780 la segunda edición de su *Essai*, para lo cual pensó no sólo incluir en su texto la descripción de 746 cristales de especies distintas, sino que con un espíritu científico-comercial, además, pensó en preparar una colección de 438 modelos cristalinos en terracota. Para este fin entró en relaciones con Smebach, que iba a producir los modelos. Con el fin de preparar el material original del cual se pudieran producir los modelos, Delisle encargó a Arnould Carangeot (1742-1806) y a Claude Lermine (1749-1806), dos discípulos suyos, el trabajo de preparar los modelos en cartulina. Cansado del método que seguían los pasos de Steno, de dibujar sobre cartulina los perfiles de las caras, Carangeot pensó que era más práctico construir un aparato que permitiera medir los ángulos directamente en el cristal.

La resolución práctica del problema fue la invención del goniómetro de contacto, que, en esencia, era un semicírculo graduado con una alidada para aplicar al cristal. El primer modelo fue construido en plata, siguiendo las instrucciones de Carangeot, por el orfebre Nicolás Vincard, en 1782. Una vez construido, y vista la utilidad práctica del invento, Carangeot publicó el invento al año

⁴² Romé de l'Isle, *Cristallographie*, Introducción.

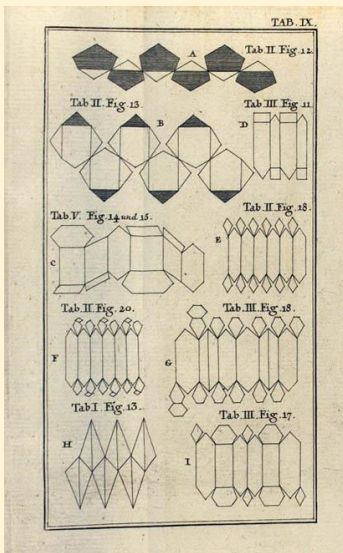
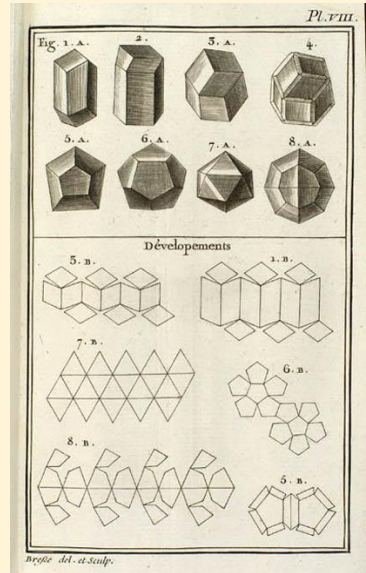
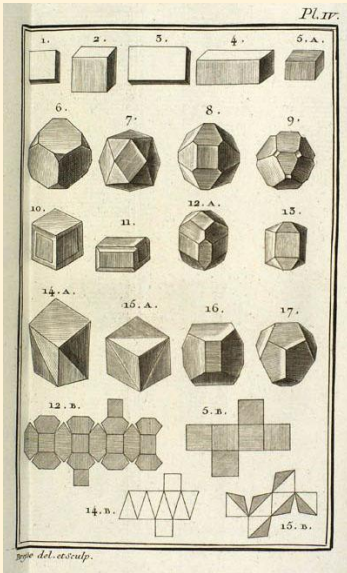
⁴³ Maurice Daumas, *Histoire de la Science*, Librairie Gallimard, 1957, 1904 pp.

siguiente ⁴⁴. El instrumento se hizo prontamente célebre, y sirvió para transformar en cuantitativa una ciencia que era, hasta entonces, fundamentalmente cualitativa. Pero, además, permitió a Carangeot darse cuenta de que muchos de los ángulos que medía en cristales diferentes de la misma especie eran constantes, y diligentemente comunicó a su maestro el descubrimiento. La ley fue reconocida inmediatamente por Delisle, que la incluyó en su obra. Sin embargo, Delisle nunca se atribuyó el descubrimiento, aun cuando en muchos libros de cristalografía se le cita como el descubridor. Esta actitud de Delisle no parece que fuera consecuencia de una humildad, que no tenía, sino que probablemente fue consecuencia de que Delisle se dio cuenta que no hacía más que generalizar una observación de Steno, que conocía, como se prueba no sólo porque citó el *Prodromus*, sino porque reprodujo figuras de aquel autor ⁴⁵ y utilizó su método. Todo ello no minimiza a Delisle, puesto que fue él quien formuló este principio como una de las verdades fundamentales de la cristalografía.

⁴⁴ A. Carangeot, «Goniomètre, ou mesure-angle», *Journal de Physique*, 22 (1783). página 193.

⁴⁵ Romé de l'Isle, *Cristallographie*, 2^a edición, vol. 1, p. 379.

La gran aventura del cristal



Modificado de FIG. 21
(Amorós, 1978).- *Ilustraciones de Romé de l'Isle, que incluyen el método de Stensen para construir modelos en cartulina.*

EL MÉTODO DE LAS TRUNCADURAS

En contra de la opinión general de que la morfología cristalina era demasiado variable para servir para algo, de l'Isle, definió el fenómeno de la cristalización como la propiedad de un mineral según la cual éste elige una forma poliédrica que le es propia y específica, y por tanto, diferente de la de los demás. Realista como era, de l'Isle, reconoció la variabilidad de la morfología de una especie mineral, como el ejemplo de la calcita mostraba sin lugar a dudas. Incluso indicó que la morfología podía ser alterada por la acción de otras sustancias, como en el caso de la sal común que cristaliza en cubos a partir de soluciones acuosas, pero que adquiere hábito octaédrico cuando a la solución se añade urea ⁴⁶. A pesar de la realidad de esta variabilidad en la forma, de l'Isle afirmaba:

Esto no impide que la forma pueda considerarse, cuando se presenta, como un carácter distintivo de cada sustancia, puesto que deriva de la propia naturaleza de la sustancia y de la combinación más o menos íntima de sus constituyentes principales ⁴⁷.

Romé de l'Isle, en su intento de explicar la variabilidad de las formas cristalinas, generalizó las ideas que Linnaeus y Werner habían dado sobre la truncadura de vértices y biselamiento de aristas. Como aquellos autores, de l'Isle se percató de que el paso de una forma a otra se podía explicar por una serie de truncaduras más o menos importantes, observando numerosos ejemplos que la propia naturaleza ofrecía como confirmación del método mismo. Con el fin de evitar falsas interpretaciones, y en especial, para evitar explicaciones metafísicas, de l'Isle fue suficientemente explícito al indicar lo que él entendía por la operación truncadura. Así nos dice:

Sé muy bien que la naturaleza no empieza produciendo un cristal completo y que produce truncando aquí y allá con mayor o menor intensidad. Cuando afirmo que un cristal está truncado en sus vértices o en sus aristas, a lo que me refiero es al aspecto según el cual se muestra a

⁴⁶ Romé de l'Isle, *Cristallographie*, 2^a ed., vol. 1, p. 379.

⁴⁷ *Idem*, p. 1.

nuestros ojos, y utilizando solamente una bien conocida expresión que se refiere a una operación cuya naturaleza todavía es un misterio para nosotros⁴⁸.

Para de l'Isle, la truncadura era una manera de describir lo que los cristales nos muestran, pero en modo alguno una operación genética. En otras palabras, la truncadura constituía un método, en modo alguno una teoría. Como método se basaba en la elección de una forma a partir de la cual se podían deducir las obras, aplicando un método lógico. La forma original la denominó forma primitiva del cristal, reservando le nombre de formas secundarias a las demás.

El método, pues, era claro. Pero de l'Isle, al deducir las formas secundarias que se pueden producir a partir de la forma primitiva trató cada caso con independencia, sin llegar nunca a formar un cuerpo de doctrina. Más aún, nunca dijo en qué se basaba cuando aplicaba el método. En otras palabras, Romé de l'Isle no se dio cuenta del papel que jugaba la simetría en la posible aparición de unas u otras truncaduras, ni a qué se debía la aparición de truncaduras en el cristal.

OTRAS IDEAS DE ROMÉ DE L'ISLE

Como se deduce de una de las citas en las páginas anteriores, de l'Isle creía que la forma cristalina era la consecuencia de la agrupación de partículas elementales. A estas partículas les dio el nombre de moléculas integrantes, nombre que en manos de Haüy iba a tener importancia fundamental en la ciencia de los cristales. Para de l'Isle estas moléculas integrantes tenían forma específica, probablemente poliédrica, como se deduce de sus palabras:

Uno debe necesariamente suponer que las moléculas integrantes de los cuerpos tienen cada una de ellas, de acuerdo con su naturaleza específica, una forma constante y fija, y que estas moléculas, que tienen ciertas analogías comunes, tienden a agruparse mutuamente ya sea indistintamente

⁴⁸ Romé de l'Isle, *Cristallographie*, Prefacio, pp. XXVII-XXVIII.

según sus caras, o según aquellas caras que proporcionan el mejor contacto absoluto y más próximo ⁴⁹.

Al expresarse así, de l'Isle no hacía más que repetir, quizás con una expresión mejor y más acertada, una idea ya conocida en el siglo XVII (ver Capítulo 3). La idea era lógica, pero de l'Isle no supo encontrar la prueba, que sólo unos años más tarde debía proporcionar Haiüy, al interpretar el fenómeno de la exfoliación. Que de l'Isle no supiera y no pudiera profundizar en el tema, nos indica claramente que era un producto de su tiempo, incapaz de dar el salto genial que necesitaba la ciencia que él había fundado. Como prueba de lo arraigado que estaba en las creencias de su tiempo baste decir que aceptó cuatro elementos secundarios, el ácido o principio cohesivo, el flogisto o principio responsable de la fluidez y volabilidad, el principio térreo que lo llamó *terre absorbante*, y el principio acuoso. Estos cuatro principios suponía se presentaban siempre en combinación, en diferentes proporciones. Todavía de l'Isle afirmaba que la sal

es el principio de todas las formas angulares y poliédricas que presentan las demás sustancias del reino mineral ⁵⁰.

La ciencia en general, y la cristalografía en especial, todavía había de recorrer un largo camino hasta entrar en el Camino Real.

⁴⁹ Romé de l'Isle, *Essai*, pp. 13 y 14.

⁵⁰ Romé de l'Isle, *Essai*, p. 7.

6. TEORÍA DE COHESIÓN

ATOMISMO Y COHESIÓN

El atomismo, como hemos visto, se basaba en las ideas de que «los átomos no son lo que es mínimo, sino lo que no puede dividirse», como había dicho Epicuro. Era su indivisibilidad, su solidez como los atomistas decían, lo que caracterizaba a los átomos. Estaba claro en esta concepción que la materia no era otra cosa más que una agrupación de estos corpúsculos o átomos de tamaño mínimo, mínimo que derivaba de su imposibilidad de ser divididos y no de un concepto matemático de mínimo. Los átomos eran concebidos como los mínimos físicos, de donde se dedujo que eran los principios primeros y universales de los cuerpos. Junto a esta idea de la finitud de la división, el atomismo concebía la existencia de un vacío entre estas partículas últimas. El espacio se concebía como vacío con átomos en él.

El atomismo fue aceptado no sin fuerte oposición. Una de las cuestiones más espinosas era el problema de la cohesión. ¿Cómo puede ser, preguntaban los antiatomistas, que si los átomos son lisos y esféricos, y, además, separados por un vacío, cómo puede ser que se agreguen formando cuerpos sólidos? El atomismo debía resolver este problema y gracias a ello se desarrolló la teoría de la cohesión.

La primera idea, tal como Charleton expuso, fue suponer que los átomos no eran esféricos, sino de cualquier forma y con superficies variadas. Veamos en las palabras de Charleton cómo se entendía la cohesión como un mero proceso mecánico:

que aunque átomos lisos y esféricos no puedan por mutua aprehensión y entrelazamiento constituir una masa, empero pueden unirse y retenerse por los garfios, y acomodarse a las rugosidades y ángulos de otros átomos de figura angular, y así coalescer una masa que no necesita de otro cemento aparte de la dependencia mutua de sus partículas constitutivas, para mantener su tenacidad y compingencia ¹.

Estas ideas mecánicas las encontramos también en una persona tan inquisitiva como Robert Boyle, como revelan las siguientes citas:

de la rugosidad e irregularidad de los corpúsculos depende su cohesión ²,

o incluso cuando decía que

los átomos están tan entremezclados, que existe entre ellos una cohesión mutua, por la cual no pueden fluir o difundirse ³.

Parecía que Boyle tenía un concepto moderno de cohesión, pero, en realidad, la cohesión de la cual hablaba era de naturaleza metafísica, pues la concebía como una tendencia natural de las partículas a unirse. Tanto las ideas mecánicas de un Charleton o la necesidad de unirse de Boyle eran todavía demasiado primitivas para explicar un hecho de observación. No nos debe extrañar, por tanto, que los naturalistas, físicos y químicos, buscaran hipótesis mejores.

El libro de Gilbert sobre el magnetismo terrestre no podía dejar de influir en la elaboración de una teoría de la cohesión, puesto que era obvio que los imanes se atraían. Si los imanes se atraían, parece lógico que se pensara que fuerzas magnéticas o de otro tipo similar pudieran ser invocadas para explicar la cohesión de los átomos al

¹ Charleton, *op. cit.*, 104.

² Robert Boyle, *Works*, IV, p. 307.

³ Robert Boyle, *Works*, I, p. 401.

formar un sólido. Es interesante indicar que Stensen, en su *Prodromus*, había adoptado una interpretación de este tipo:

un cuerpo natural es un agregado de partículas imperceptibles, que están sujetas a la operación de fuerzas procedentes del imán, del fuego y, a veces, también de la luz ⁴.

A pesar de ello, Stensen, no se preocupó demasiado por el asunto y creyó simplemente que un cristal crecía por la adición de partículas nuevas a la superficie, sin indicar a qué se debía esta adición. Pero Stensen no estaba solo; Hooke, por ejemplo, creía que los átomos se agregaban naturalmente, aunque quizás invocó un principio semejante a la gravedad. Newton, que desarrolló la teoría general de la gravedad, se considera como el primero que postuló la existencia de fuerzas atractivas entre los átomos (ver Capítulo 4). Pero, en honor a la verdad, este punto de vista no está plenamente justificado, puesto que sus ideas nunca fueron claras a este respecto. Veamos, por ejemplo, lo que Newton decía a Rober Boyle en una carta fechada el 28 de febrero de 1679:

Yo supongo que este éter penetra todos los cuerpos... cuando dos cuerpos en movimiento se aproximan, supongo que el éter entre ellos se rarifica y... debido a lo cual tendrán recelo a aproximarse más aún, y tenderán a separarse entre sí; tal recelo aumentará cuanto más próximos estén, porque harán que el éter intermedio se rarifique aún más. Pero al final, cuando se aproximen tanto que el exceso de la presión del éter externo que rodea a los cuerpos, sobre la del éter rarificado, que está entre ellos, es tan grande que oponga el recelo que tienen los cuerpos a acercarse, les hará unirse fuertemente el uno al otro ⁵.

Está claro que la idea de Newton sobre cohesión atómica era puramente mecánica. En esta línea de pensamiento encontramos a Lomonosov, que después de rechazar fuerzas atractivas, creyó que la cohesión era el resultado de algo como un pegamento líquido,

⁴ Stensen, *Prodromus*, p. 214.

⁵ Sir David Brewster, *Memoirs of the life, writings, and discoveries of Sir Isaac Newton*, Edinburgh, 1855. *The Source of Science*, 14. Johnson Reprint Corporation, New York, 1965, vol. 1, XLV + 478 pp., especialmente pp. 410-412.

formado por pequeñas partículas esféricas, que mantenían unidas las partículas mayores. Lomonosov llegó incluso a ilustrar su idea en un dibujo, del cual dio la siguiente explicación:

Habiendo demostrado la naturaleza esférica de las partículas que componen los cuerpos sensibles, ¿dónde podemos hallar la superficie de contacto? Pues las esferas no se tocan más que un punto. Para contestar satisfactoriamente esta pregunta es necesario definir lo que entiendo por superficie de contacto (que debería llamarse superficie de cohesión): es decir, sea un círculo cuyo diámetro es la línea BID entre las partículas A y E que están en contacto, cuya periferia está ocupada por esferas muy pequeñas B y D de material líquido comprimido, no llegando a I, porque los espacios EFI y CHI son muy angostos. Suponiendo esto, no habrá material comprimido en las regiones intermedias EIG y FIH de las esferas A y C, porque no hay espacio. Así, las partículas A y C, en contacto al líquido comprimido en el resto de su superficie, se unen mediante el círculo o plano de coherencia. De aquí se deduce la siguiente regla: cuanto mayor sean las partículas insensibles que forman un cuerpo, más fuerte será la unión entre ellas, y cuanto menores sean, más débil será ⁶.

La idea de Lomonosov no era, por tanto, diferente de la que tenía Newton. En realidad, expresar que los cuerpos esféricos, rodeados del éter, o apegados mediante una especie de cola formada por partículas menores, dejaba sin contestar la cuestión fundamental: por qué existe cohesión entre partículas. La cohesión se dejaba así de lado, quedando sin una interpretación lógica. Por otra parte, esta actitud venía corroborada por la propia teoría atomística, pues al considerar los átomos como partículas materiales desprovistos de toda propiedad, impedía incluso pensar en una cohesión basada en una propiedad que por definición no existía.

La solución al problema surgió cuando, al idealizar la imagen de las partículas atómicas, se las redujo a puntos casi matemáticos, y a los cuales se asociaban ciertas fuerzas. Los protagonistas de este cambio fueron dos hombres de Iglesia, Swedenborg y Boscovich, protestante uno y católico el otro y ambos de la segunda mitad del siglo XVIII. Al primero debemos la teoría de la polaridad en los

⁶ Lomonosov, op. cit., *On the solidity and liquidity of bodies*, pp. 238-239.

corpúsculos atómicos. Emanuel Swedenborg (1688-1772) ⁷ fue un cartesiano que trató el problema de la asociación sucesiva de dos, tres... n partículas definidas como puntos materiales y dotadas de un movimiento rotatorio, muy semejante a los vórtices cartesianos. Swedenborg fue un profeta, un adelantado a su tiempo. Considerando que sus partículas elementales eran equivalentes a imanes elementales, compuso unos modelos atómicos que hoy en día parecen interpretar los problemas de las partículas elementales que la física corpuscular tiene planteados.

BOSCOVICH

La teoría de Swedenborg adolece del gran problema de su complejidad. La de Boscovich, por el contrario, tiene la grandeza de la simplicidad.

Roberto Joseph Boscovich (1711-1787) fue otra de las figuras trágicas de la ciencia, que con harta frecuencia hemos encontrado y seguiremos encontrando a lo largo de este libro. Nació en Ragusa el 18 de septiembre de 1711 de una familia serbia; lo encontramos bien pronto estudiando en un colegio de los jesuitas, lo cual ayudó que al sentir la llamada de la vocación entrase, en 1725, en la Orden que le había formado, ordenándose sacerdote años más tarde en 1744. Por aquel tiempo Boscovich era profesor de matemáticas en el Collegium Romanum, en Roma, lejos de su país. No sólo fue Roberto José un matemático de fama, sino que también lo fue como filósofo, astrónomo, físico, historiador, ingeniero y poeta. Como hijo de su siglo, conoció buena parte de Europa, pues se movió mucho en su vida. Fue durante su estancia en Viena, entre 1756 y 1758, cuando escribió su obra científica más importante, su *Theoria Philosophique Naturalis*, que publicó en forma revisada en Venecia en 1763, a cuya edición siguieron pronto otras dos.

Boscovich fue pronto reconocido como un científico de altura, siendo aceptado y elegido en el seno de numerosas sociedades

⁷ James R. Rendell e I. Transley, *The Principia*, by Emanuel Swedenborg, 2 vols., Londres, 1912.

científicas de toda Europa. Sus problemas personales empezaron con una controversia con el astrónomo Lagrange, problema que se agravó con la eliminación de los jesuitas por Clemente V en 1773.

Como un exjesuita, ya no fue bien recibido como científico, y a pesar de que lograra ser nombrado Director de la Optique Marine de París y adquiriera la nacionalidad francesa, bien pronto la enemistad de d'Alembert le forzó a abandonar Francia y volver a Italia. Su salud se deterioró rápidamente, y la enfermedad que había atacado a Huygens, la melancolía, pronto hizo presa en él. De esta época es su sueño:

Siempre he deseado encontrar la verdadera paz en mi propio país, y, con la venia de Dios, pasar mi edad vieja allí tranquilo ⁸.

Sin poder lograrlo, Boscovich murió en Milán el 13 de febrero de 1787.

LA TEORÍA DE BOSCOVICH

Las ideas de Boscovich eran evidentemente atomísticas. Para él, los elementos primarios de la materia son puntos perfectamente indivisibles y sin extensión; están distribuidos en un inmenso vacío, de tal manera que cada dos de ellos están separados entre sí por un intervalo definido; este intervalo puede aumentar o disminuir indefinidamente, pero no puede nunca desaparecer sin que exista compenetración de los mismos puntos, pues yo no admito como cosa posible contacto inmediato entre ellos ⁹.

Suponía Boscovich que la materia estaba como disuelta en el vacío y que flotaba en él, y que los puntos materiales, los átomos, estaban dotados de inercia. En este punto sus ideas no eran fundamentalmente nuevas, la novedad residía en su concepto de fuerzas actuando entre átomos; para nuestro autor,

⁸ Roger Joseph Boscovich, *A theory of natural philosophy*, trad. inglesa. The MIT Press, Cambridge Mass (1966), XXI + 229 pp., especialmente p. IX.

⁹ *Ibid.*, p. 20.

las fuerzas son repulsivas a distancias muy cortas, y crecen indefinidamente a medida que la distancia disminuye, de tal manera que pueden destruir cualquier velocidad, independientemente de su valor, con la que un punto pueda aproximarse a otro, incluso antes de que la distancia entre ellos desaparezca.

A medida que la distancia mutua aumenta, dichas fuerzas repulsivas disminuyen, de tal suerte que, a cierta distancia, que es muy pequeña, la fuerza se hace nula. Entonces, a medida que la distancia sigue aumentando, las fuerzas se cambian en atractivas; éstas, al principio aumentan, disminuyendo después, se desvanecen y se transforman en repulsivas, que de la misma manera aumentan, después disminuyen, se hacen cero, y se hacen una vez más atractivas, y así sucesivamente, para un gran número de distancias, que son todavía muy pequeñas, hasta que, finalmente, a distancias relativamente grandes, empiezan a ser continuamente atractivas y, aproximadamente, inversamente proporcionales al cuadrado de la distancia ¹⁰.

El propio Boscovich representó en una figura esta secuencia de fuerzas. La parte DE de la curva representa la variación de la fuerza repulsiva en la vecindad del átomo, representado en A. La periodicidad de atracción y repulsión, tal como Boscovich la representó, se parece mucho a la concepción moderna de dichas fuerzas en un cristal. Esta semejanza se hace total cuando unimos la parte de la curva DF con la RSV, con lo que se obtiene la curva idéntica al modelo de dos átomos que Born ha propuesto en nuestro tiempo para la interacción de dos partículas. Al introducir la hipótesis de fuerzas de repulsión y de atracción con su corto y largo alcance respectivamente, Boscovich sentó la cohesión en los términos que hoy se aceptan. Incluso tuvo la idea clara de las fuerzas de largo alcance y la interacción mutua de dos cuerpos, como se demuestra en el siguiente texto:

...toda partícula material está conectada con otra partícula, independientemente de su distancia mutua, de tal manera que, siempre que

¹⁰ Boscovich, *op. cit.*, pp. 21 y 23.

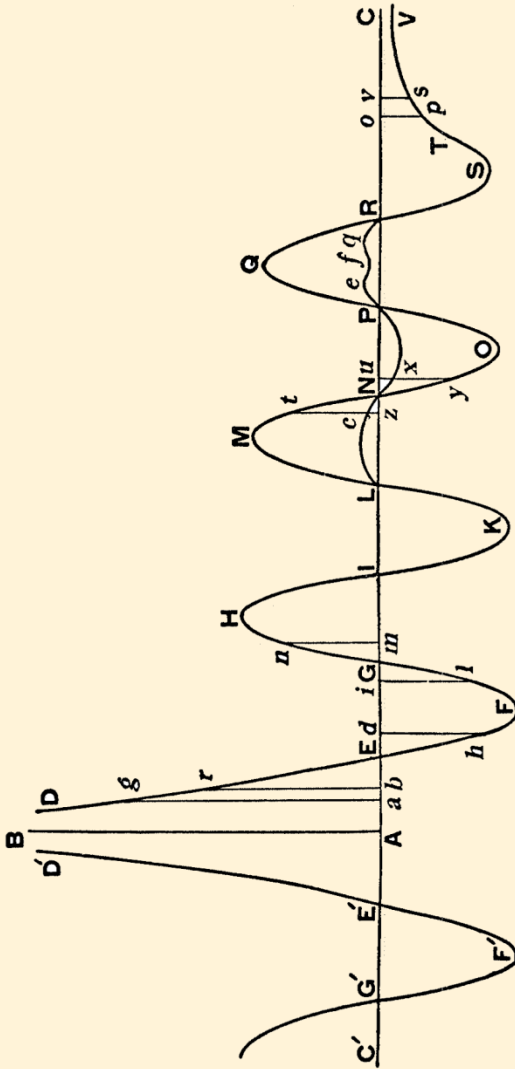


FIG. 23.- Concepción de la cohesión, según Boscovich, basada en fuerzas atractivas y repulsivas.

se produzca un cambio en la posición, por muy pequeño que este sea, en cualquiera de ellas, los factores que afectan al movimiento de todos los demás se alteran; y, a menos que sus efectos se cancelen, (y ello es infinitamente improbable), se producirá un cierto movimiento en todas y cada una de las partículas, debido al cambio de posición citado ¹¹.

Al leer este párrafo nos damos cuenta de la modernidad del pensamiento de Boscovich, pues precisamente esta idea ha servido para desarrollar la teoría del cristal dinámico, y, en especial, la teoría de las ondas térmicas del cristal.

Fue este autor también el que, por primera vez, se refirió al crecimiento discontinuo de un cristal. Para explicar este concepto, Boscovich hizo uso de un símil de gran belleza:

Consideremos la altura de una nueva casa en construcción; a medida que se añade una nueva hilera de piedras, la altura de la casa parece aumentar instantáneamente, sin pasar por pasos intermedios. Si se dice que ello es debido a que la casa es un producto de la técnica y no de la naturaleza, la misma dificultad se presenta en un producto de la naturaleza, cuando se forman diferentes estratos de hielo o cualquier otro tipo de incrustaciones, y en cualquier caso que un incremento tiene lugar por la adición externa de partes, donde parece tengan lugar adiciones finitas, sin pasar por magnitudes intermedias. En este caso la continuidad se conserva en el movimiento por la adición de partes independientes. Estas partes se adicionan según líneas continuas y con un cambio continuo de velocidad ¹².

A pesar que, desde el punto de vista conceptual, la teoría de Boscovich no tuvo muchos seguidores, probablemente debido a que se la consideraba demasiado abstracta, y quizás excesivamente idealista, un grupo importante de científicos ingleses, entre los que contaban personajes tan prestigiosos como Joseph Priestley, Davy, Faraday y Lord Kelvin, lo aceptaron como una contribución importante.

¹¹ Boscovich, *op. cit.*, p. 19.

¹² Boscovich, *op. cit.*, p. 62.

DISTRIBUCIÓN GEOMÉTRICA DE LOS ÁTOMOS EN LOS CRISTALES

Uno de los hechos más decisivos en la historia de la ciencia lo marca el desarrollo, a finales del siglo XVIII, de la nueva química. Esta nueva química surgió del abandono definitivo de la ya harto modificada teoría de los cuatro elementos, y la adopción de la teoría atomística, que de ahora en adelante la podemos llamar teoría atómica, basada en la interpretación de hechos experimentales, que se iban acumulando con rapidez pasmosa. El desarrollo conceptual de esta nueva química se debió, en gran parte, al químico inglés John Dalton (1766-1844), y especialmente a su obra titulada *New System*¹³. Siguiendo la norma que nos hemos trazado en este libro, no estamos interesados en llevar a cabo un estudio de la química de Dalton, pues para ello existen otros autores más versados en el tema. Lo que sí nos interesa es referirnos a las ideas que Dalton tenía de los sólidos y de la distribución geométrica de los átomos al formar las moléculas. Según nuestro autor,

un cuerpo sólido es aquel en el cual las partículas se hallan en estado de equilibrio entre dos grandes fuerzas, atractiva y repulsiva, de tal manera que no se puede alterar sus distancias mutuas sin el empleo de una fuerza considerable. Si se intenta una mayor aproximación de las partículas, el calor se opone a ello; si se intenta una separación, la atracción la resiste. La noción de Boscovich de planos alternantes de atracción y repulsión parece innecesaria; excepto que al romper mediante un esfuerzo la cohesión de cualquier cuerpo, la nueva superficie debe recibir una modificación tal en su atmósfera de calor que se oponga a la unión de las superficies separadas¹⁴.

La distinción esencial -sigue diciendo Dalton- entre líquidos y sólidos, quizás consiste en que el calor cambia la figura de la distribución de las últimas partículas del primero continua y gradualmente, mientras mantienen su forma líquida; por el contrario, en el último es probable que el cambio de temperatura no hace nada más que cambiar su tamaño, y no la distribución de las partículas últimas.

¹³ John Dalton, *A new system of chemical philosophy*, 2 vols. Manchester, R. Bickerstaff, 1808, VI + 560 pp.

¹⁴ Dalton, *op. cit.*, pp. 208-209.

Este último párrafo recoge una idea muy interesante al explicar, como lo hacemos hoy en día, la dilatación térmica por la variación en el volumen efectivo de los átomos. Fue precisamente esta preocupación por el tamaño efectivo de los átomos lo que indujo a Dalton a determinar los diámetros relativos de lo que él llamó átomos elásticos de un fluido. Como probablemente fue la primera vez que este concepto se utilizó, vale la pena reproducir la figura en la que el propio Dalton reunió los tamaños relativos de ciertos átomos y moléculas. Dalton representó los átomos o moléculas por cuadrados cuyo lado era proporcional al diámetro de los átomos que él mismo había determinado. Podemos ver en la figura cómo Dalton concebía las moléculas como formadas por átomos agrupados en cierta forma geométrica, de cuya idea, con el correr del tiempo, se desarrollaría la estereoquímica.

EMPAQUETADO DE ÁTOMOS EN LOS CRISTALES

Dalton supuso que la cristalización era el efecto de la agrupación natural de las últimas partículas que él creía globulares. Es evidente que Dalton conoció los trabajos de Hooke, pues trató también de explicar la forma externa de los cristales en función de la distribución geométrica de dichos átomos globulares. En fin, según Dalton,

La forma romboidal puede resultar de la posición adecuada de 3, 6, 8 ó 9 partículas globulares; la forma cúbica, 8 partículas; la triangular de 3, 6 ó 10 partículas; el prisma hexagonal de siete partículas, etc. Quizás, en el futuro, podamos llegar a conocer el número y la ordenación de él, determinar la figura que preferirá en la cristalización, y viceversa ¹⁵.

Dalton preveía, por tanto, que el estudio de los cristales debía basarse en el conocimiento de su estructura, y que ésta podría explicar la morfología cristalina. La cristalografía moderna le ha

¹⁵ Dalton, *op. cit.*, pp. 210-211.

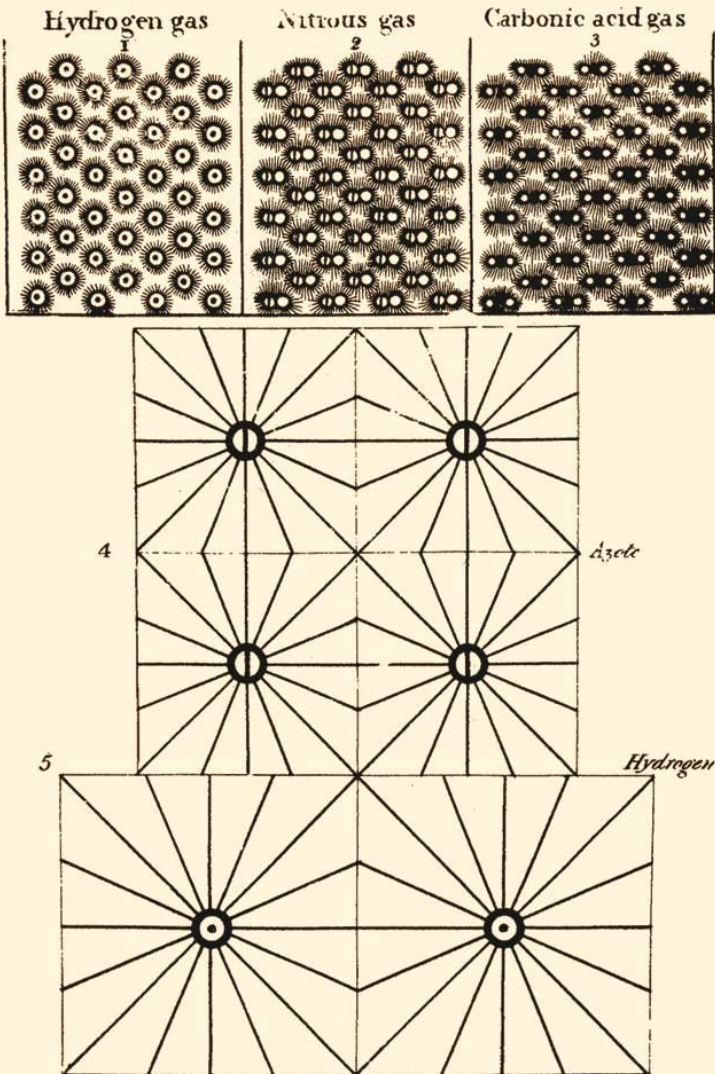


FIG. 24.- Estructura de gases y volumen de acción atómico de Dalton.

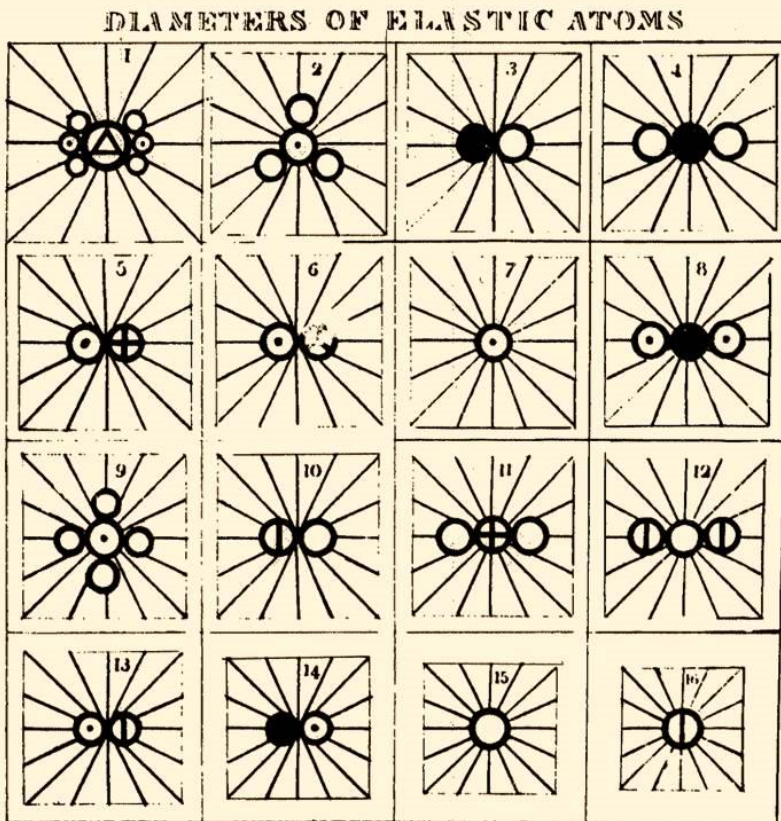


FIG. 25.- *Volumen molecular, según Dalton.*

dado la razón. Pero Dalton quizás fue demasiado lejos en su interpretación geométrica de la materia, pues creyó que un líquido también estaba formado por una geometría propia de átomos o moléculas, e incluso lo representó. Fue esta idea, la de una distribución geométrica de corpúsculos esféricos, la que le indujo a interpretar, erróneamente, la transición del hielo (sólido) al agua (líquido) en función de estructuras diferentes. Así nos dice:

Con el fin de explicar estos fenómenos (formación del hielo) imaginemos que los últimos o menores elementos de agua son globulares, exactamente del mismo tamaño; supongamos que la distribución de estos átomos sea en cuadros; como se representa en la figura 5ª, de tal manera que cada partícula toca otras cuatro en el mismo plano horizontal. Imaginemos ahora un segundo estrato de partículas colocado sobre el anterior, pero de tal manera que cada glóbulo caiga en la concavidad de los cuatro del primer estrato, y por tanto, reposa sobre cuatro puntos, elevado 45° sobre los centros de los glóbulos, supongamos además un tercer piso colocado como el segundo lo hacía sobre el primero y así sucesivamente. El conjunto es semejante a un montón de perdigones. La citada constitución supongo representa el agua a la temperatura de su máxima densidad.

Ahora consideremos que el cuadrado se modifica instantáneamente en un rombo; entonces cada estrato horizontal todavía consistirá del mismo número de partículas como antes, sólo que ahora lo hará en forma más condensada, pues cada partícula está ahora tocando a otras seis ¹⁶.

Dalton supuso que la última estructura correspondía al hielo, sin darse cuenta que ambas estructuras eran idénticas, tal como ya en el siglo XVI Kepler había demostrado. Y no sólo erró en esto, sino que la variación de la densidad, que erróneamente le atribuyó, no respondía al modelo elegido. La estructura hexagonal le sirvió, con todo, para explicar las dendritas de hielo y sus ángulos.

En el *New System* de Dalton aparece este remarcable pensamiento:

Siempre que tiene lugar un cambio importante en la construcción de un cuerpo dado, ya sea por la adición de nuevas partículas, o por una nueva

¹⁶ Dalton, *op. cit.*, pp. 135-138.

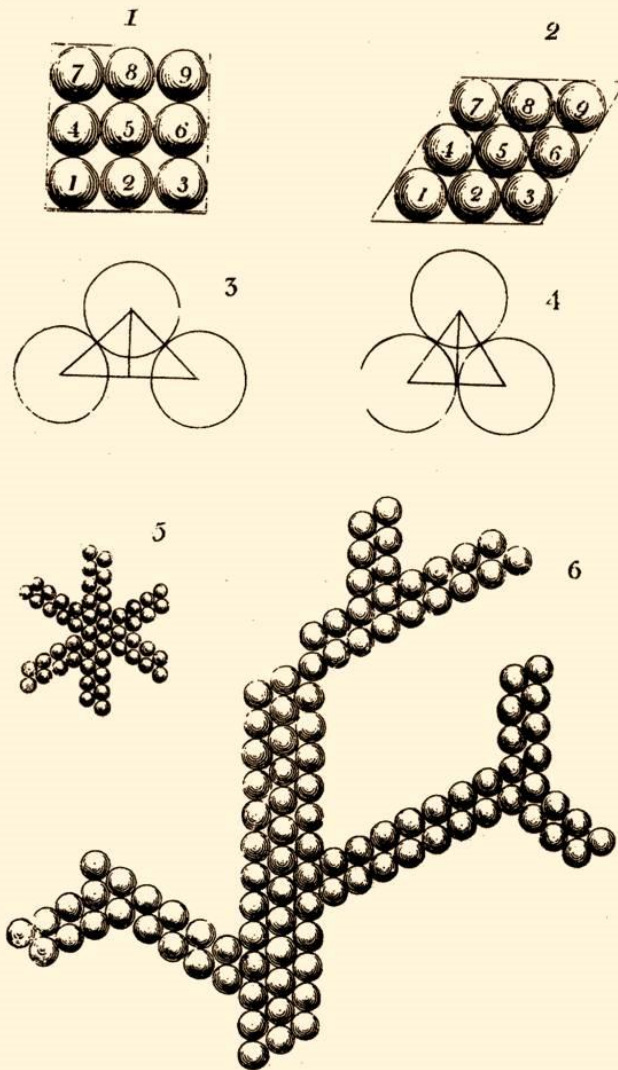


FIG. 26.- *Empaquetado de bolas de Dalton y estructura de una dendrita.*

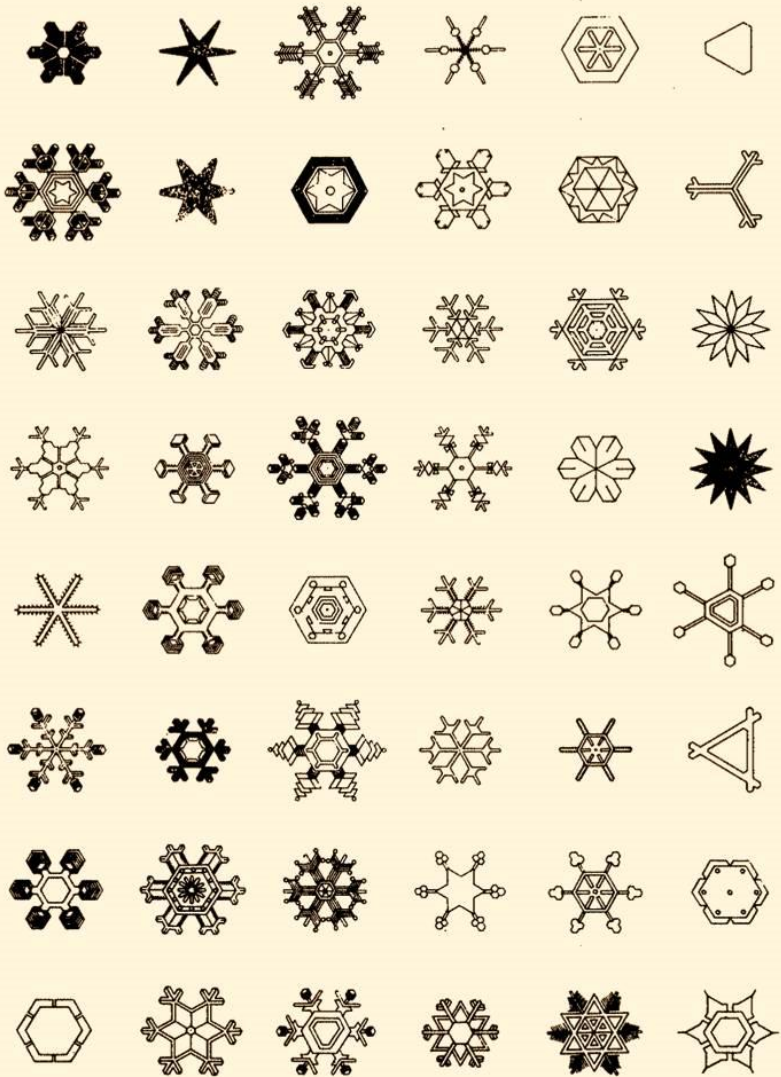


FIG. 27.- *Cristales de nieve de Scoresby.*

ordenación de las que ya existen en él, se requiere modificación en la atmósfera de calor.

.....Si en esta frase de Dalton sustituimos «atmósfera de calor» por «vibraciones térmicas», nos encontramos con la predicción de que la dinámica cristalina es consecuencia de la estructura del cuerpo. Por otra parte, la posibilidad, prevista por Dalton, de una nueva ordenación de los átomos en el cuerpo, constituye un anticipo del fenómeno del polimorfismo, que pronto iba a ser descubierto.

WOLLASTON Y LA ESTRUCTURA ATÓMICA DE LOS CRISTALES

A pesar de que la teoría del cristal enunciada por Haüy, y que será expuesta en el próximo capítulo, pronto se convirtió en la teoría aceptada en la ciencia de los cristales, vale la pena traer aquí, rompiendo el orden cronológico, las últimas consecuencias del atomismo en cuanto se refiere a la estructura de los cristales. Nos estamos refiriendo aquí a las ideas expuestas por un célebre discípulo de Dalton, William Hyde Wollaston (1766-1828), un notable físico y químico que hizo fortuna descubriendo el método de trabajar el platino, metal que hacía poco había sido descubierto por el español Ulloa.

Wollaston, como la mayor parte de los químicos de su época, tenía profundo interés en el conocimiento de los cristales, interés que, unido a su preparación como físico, le permitió inventar un nuevo goniómetro basado en principios totalmente distintos de los que Carangeot empleó, y que tenía mucha mayor precisión. Este instrumento fue el goniómetro de reflexión ¹⁷.

El goniómetro desarrollado por Carangeot servía para medir ángulos en cristales grandes y bien desarrollados, que sólo se presentaban, en general, en minerales de colección. Por el contrario, la multitud de cristales que el químico producía por cristalización de soluciones eran pequeños, y por tanto, el aparato del francés no

¹⁷ William Hyde Wollaston, «Description of a reflective goniometer», *Phil.Trans.* (1809), 254-258.

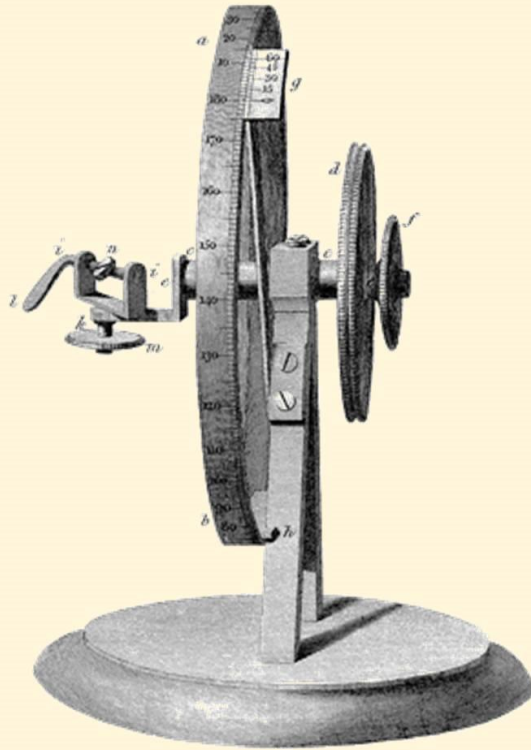


FIG. 28.- *Goniómetro de reflexión de Wollaston.*

permitía la obtención de datos que tan valiosos hubieran sido. El instrumento que Wollaston ideó se basaba en utilizar la reflexión de la luz en las caras del cristal, y por tanto, necesitaba tan sólo cristales buenos, independientemente de su tamaño, puesto que las caras habían de actuar como espejos. La medida del ángulo entre las caras era igual al ángulo que se precisaba girar el cristal para que otra cara reflejase. Entre las ventajas del instrumento, cabe citar que una vez se hacía coincidir una arista con el eje de giro, permitía la medida de una serie de reflexiones sin cambiar la orientación del cristal. Esta posibilidad permitió el descubrimiento de las zonas en un cristal y con ello el desarrollo de la escuela cristalográfica alemana. Dicho goniómetro está indisolublemente unido al descubrimiento del isomorfismo que Mitscherlich había de revelar unos años después. De todas estas consideraciones se deduce que Wollaston hubiera tenido el honor de ser incluido en una historia de la ciencia de los cristales aunque sólo hubiera sido el inventor del goniómetro de reflexión; pero existen razones mucho más poderosas para su inclusión en ella.

Entre estas razones, la que nos interesa más en este momento es su memorable conferencia Bakeriana, que como miembro de la Royal Society pronunció el 26 de noviembre de 1812, en la cual analizó como ninguno hasta aquel día, las ideas atomísticas aplicadas a la interpretación de la estructura de los cristales. El punto de partida de su teoría consistía en lo siguiente:

Entre las formas conocidas de los cuerpos cristalizados, no existe más que el octaedro regular que sea común a un mayor número de sustancias, y ninguna otra a la que sea más difícil atribuir qué modificación de dicha forma corresponde a la forma primitiva; además en todas estas sustancias el tetraedro tiene las mismas posibilidades que aquélla de ser la forma original de la cual todas las demás son modificaciones ¹⁸.

Wollaston consideraba que el octaedro y tetraedro eran las dos formas fundamentales del cristal. Utilizando el viejo modelo de

¹⁸ William Hyde Wollaston, «On the elementary particles of certain crystals», *Phil. Trans.*, 2 (1813), 51-63.

Hooke de un empaquetado de bolas, demostró que ambas formas podían obtenerse una de otra. Así nos dice:

Hay una observación con respecto a estas formas que parecía paradoja, a saber que una estructura que se inicie con formación cuadrada es intrínsecamente la misma que la que se inicia con base triangular. Pero si colocamos el grupo octaédrico formado por seis bolas, sobre uno de sus lados triangulares, y por consiguiente, con una cara superior opuesta y triangulares, los dos grupos, formado cada uno de ellos por tres bolas, están situados precisamente como se encontrarían en los estratos adyacentes de distribución triangulares. Por tanto, en esta posición, podemos fácilmente convertir el octaedro en un tetraedro regular, añadiendo cuatro bolas más. Una bola situada sobre otras tres, forma el vértice; y si la base triangular, sobre la que reposa dicha bola, se amplía añadiendo tres bolas más, regularmente dispuestas a su alrededor, el grupo de diez bolas así formado representa un tetraedro regular ¹⁹.

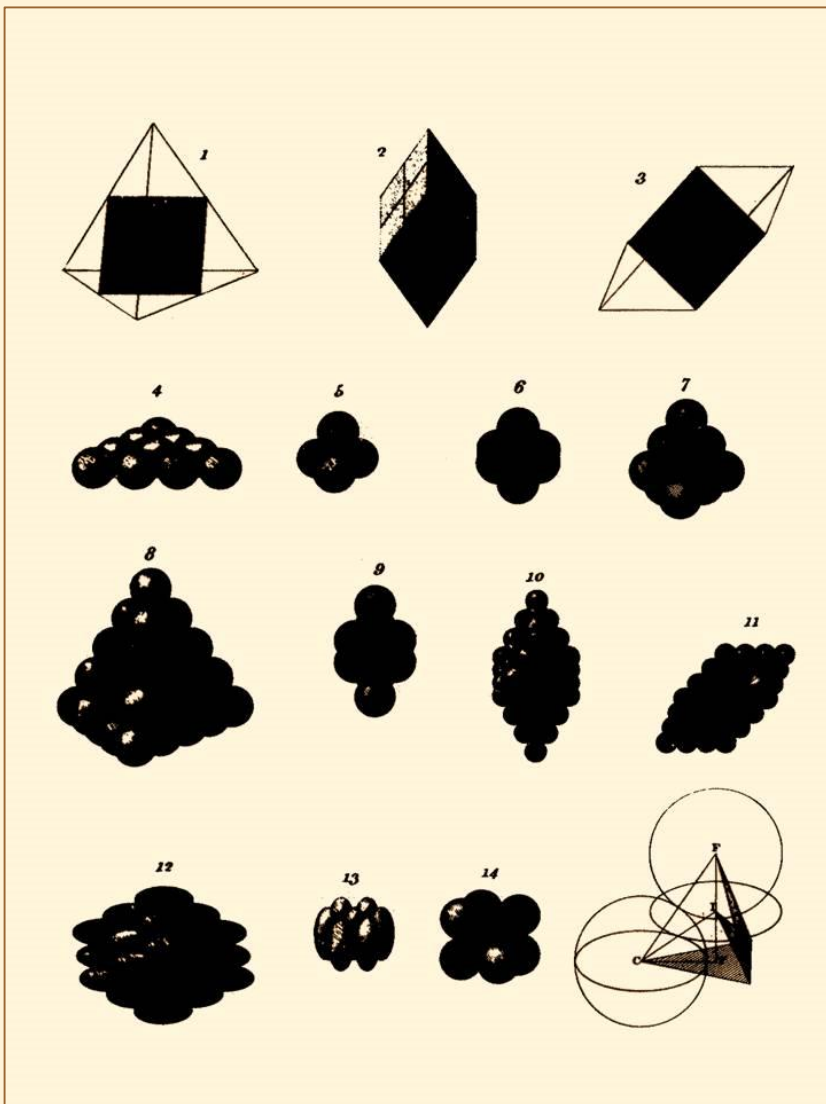
Es curioso señalar que Wollaston sólo interpretó el empaquetado cúbico, que ya Kepler había derivado tanto de una superposición de pisos cuadrados o de pisos triangulares sin encontrar el empaquetado hexagonal.

Con nuevas manipulaciones, Wollaston dedujo la posibilidad de formar un romboedro similar al de la calcita. Y todo ello sin variar la estructura empaquetada. La variación de los ángulos del romboedro se podía lograr, como Huygens había hecho, sustituyendo las esferas por elipsoides oblatos u oblongos.

En estos casos, la exfoliación podía explicarse por la diferente atracción entre los elipsoides, que resultaba, según Wollaston, de la situación anisótropa de sus centros. Por ejemplo, un apilamiento hexagonal de elipsoides oblongos explicaría, según dicho autor, la exfoliación hexagonal del berilo o del fosfato magnésico.

Hasta aquí podría parecer que la conferencia no era más que repetir conceptos e ideas que ya Hooke y Huygens habían avanzado. No obstante, el valor de la misma residió en las nuevas ideas que expuso. Wollaston, que creía que sólo se podía formar con bolas esféricas un empaquetado cúbico, se encontró con el problema de

¹⁹ Wollaston, *op. cit.*, p. 55.



cómo derivar un cubo. La solución que dio al problema es interesante, pues representa la descripción por primera vez, de una estructura que hoy conocemos como tipo ClNa. Pero dejemos a Wollaston expresarse.

Consideremos -decía- una masa de materia consistente de partículas esféricas del mismo tamaño, pero de dos especies en igual número, representadas por bolas blancas y negras; y que se requiera que en su perfecta mezcla cada bola negra sea equidistante de todas las bolas blancas que le rodean, y que todas las bolas adyacentes del mismo tipo sean también equidistantes entre sí. Digo, entonces, que estas condiciones se cumplirán cuando la distribución sea cúbica y que las partículas estarán en equilibrio. La figura 8-14 representa un cubo así formado por bolas, alternativamente blancas y negras. Cuatro bolas negras están a la vista. La distancia de sus centros es en cada dirección la diagonal superficial del cubo, son equidistantes y su configuración representa un tetraedro regular; y lo mismo pasa con las bolas blancas. Las distancias de las bolas distintas adyacentes son también iguales; de esta manera las condiciones de su unión son completas, al menos en grupos pequeños; y ésta es una representación correcta de la masa entera, que estaría formada por cubos iguales y similares ²⁰.

En Wollaston, además, se nota la decisiva influencia de las ideas de Boscovich, pues nos dice:

y aunque la existencia de átomos físicos absolutamente indivisibles necesita prueba, su existencia no es necesaria a ninguna hipótesis aquí presentada, que requiere sencillamente puntos matemáticos con poder de atracción y repulsión de igual valor en todas direcciones, pues de la unión de tales partículas resultarán los mismos sólidos que de la combinación de esferas duras e impenetrables ²¹.

El empaquetado de bolas era un modelo bueno para explicar la estructura de los cristales. Sin embargo, en la época de Wollaston todavía no existía prueba que lo confirmara: se quedó, pues, en una hipótesis, elegante, pero hipótesis al fin. Más elegante era la hipótesis que Haüy presentó, como veremos en el capítulo siguiente.

²⁰ Wollaston, *op. cit.*, pp. 60-61.

²¹ Wollaston, *op. cit.*, p. 61.

Esta razón justificó dejar de lado la explicación atomística de los cristales por casi un siglo, sólo para ser redescubierta por otro inglés, Barlow, y confirmada más tarde por otro británico al utilizar la difracción de Rayos X. Como testimonio imperecedero, no obstante, de las ideas de Wollaston, los modelos de bolas de madera que usara en su célebre conferencia se conservaron, y hoy pueden admirarse en el Science Museum, de South Kensington, en Londres.

7. LOS CRISTALOCLASTAS

CRECIMIENTO CRISTALINO Y EXFOLIACIÓN DE LA CALCITA: BERGMAN

A pesar del poco impacto que tuvo el trabajo de Erasmo Bartholinus en cuanto se refirió al fenómeno de la exfoliación de la calcita, este hecho determinó al final del XVIII, el desarrollo de una nueva teoría de la estructura de los cristales, que iba a gozar de gran predicamento, y cuyas consecuencias fueron de importancia decisiva para la nueva ciencia de la cristalografía, puesto que no sólo revolucionó el concepto mismo del cristal, sino que proporcionó una base racional para el estudio de los cristales.

La metodología desarrollada por de l'Isle era, en realidad, nada más que un método morfológico, puesto que se basaba en la descripción de la naturaleza geométrica de la morfología externa de los cristales. El método no era más que la última consecuencia de la observación de los caracteres externos de los minerales. El método de l'Isle, como hemos visto, consistía en agrupar los minerales que tenían composición química semejante, y se basaba en la descripción de su morfología y en seleccionar de entre las distintas formas que los cristales de una misma especie mineral mostraban una que, por su simplicidad, suponía constituía la especie primitiva. Todas las demás

formas se generaban por truncadura, según ciertos principios. Pero el método nunca se transformó en una teoría, puesto que no se dio explicación alguna de la razón de tal truncadura, ni se relacionó la forma primitiva con la forma de las unidades que formaban el edificio cristalino. Romé de l'Isle, quizás consciente de las debilidades de la explicación atomística de la estructura de los cristales, evitó cuidadosamente cualquier explicación estructural del cristal, excepto a la cita de pasada de que Leeuwenhoek creyó que todas las partículas de la sal común tenían forma cúbica.

El avance en la teoría vino de una serie de investigadores que accidentalmente observaron la exfoliación de la calcita, y que utilizaron esta propiedad para intentar comprender la verdadera naturaleza de los cristales. Para Romé de l'Isle, que tenía un aprecio altísimo por los minerales bien cristalizados, romperlos constituía un acto casi sacrílego. Tanto desasosiego le causaba incluso la idea de romper un cristal, que ideó la palabra «cristaloclastas» para los que aquello hacían, en especial Bergman y Häüy que, a los ojos de l'Isle tan poco aprecio tenían por la belleza del mineral cristalizado. Los cristaloclastas, sin embargo, fueron los que desarrollaron por primera vez una teoría que explicaba la morfología de los cristales.

El inicio del nuevo enfoque se debió a Bergman, un discípulo de Linneo. Tobern Olaf Bergman (1735-1784) era el primogénito del sheriff del territorio de Katrineberg de la provincia sueca de Vastergotland. Bergman entró en la Universidad de Uppsala en agosto de 1752; tenía tal entusiasmo por su trabajo que no regateó esfuerzos, ajustándose a un horario excesivo, de las cuatro de la mañana a las once de la noche, horario que pronto minó su salud, habiéndolo de abandonar al cabo de un año. Entusiasmado por Linneo, se dedicó con ardor a la zoología, lo que no le impidió que cambiara después su interés por otros campos, especialmente matemáticas, física y química. Fue precisamente en este último campo donde Bergman había de distinguirse, especialmente al ser nombrado sucesor de Wallerius en la cátedra de química de aquella universidad, siendo nombrado Director del Instituto de Química. Bajo su dirección, el Instituto cobró bien pronto fama internacional, transformándose en una institución modelo, que contaba con un museo mineralógico de cierta fama. La asociación de la química y la

mineralogía en una persona seguía la tradición de Uppsala, tal como se demuestra no sólo por Wallerius y el propio Bergman, sino por Berzelius, que les siguió. Tal asociación tuvo una gran importancia en el desarrollo de la mineralogía, que sólo indicamos pero que no vamos a elaborar, pues no responde a la marcha fijada en este libro.

Fruto de esta asociación de ciencia, fue la importante obra *Meditationes de Systemate Fossilium Naturali* ¹, que publicó Bergman en 1784 y que consistía en un sistema mineralógico basado, no en los caracteres externos de los minerales, sino, como buen químico que era, en su composición química. Este trabajo, unido a su memoria sobre el soplete y su empleo en mineralogía ², le acreditaron pronto en el campo de la mineralogía, cuando ya era reconocido como químico de altura. Científico universal, Bergman llevó a cabo también importantes trabajos en otras áreas tales como la astronomía, biología, filosofía natural, geografía y física. A pesar de que su vida fue corta, pues sólo vivió cuarenta y nueve años, fue plena de éxitos. A pesar de ello, conservó siempre una gran humildad como científico, expresada en forma elocuente en el pensamiento siguiente:

Un científico lucha por comprender el trabajo de la naturaleza. Pero debido a nuestro insuficiente talento como científicos, no damos con la verdad en seguida. En realidad nos debemos conformar con ir profundizando, rodeados en tinieblas considerables, que nos obligan a hacer nuevos errores y equivocaciones. Mediante un examen diligente, quizás logremos separar poco a poco las cortezas más duras, pero pocas veces dejamos el núcleo libre, y por tanto, al fin, debemos darnos por satisfechos con un poco de conocimiento incompleto ³.

Fue precisamente uno de estos pequeños conocimientos incompletos el que iba a ser trascendental para la ciencia de los cristales. Bergman lo publicó primero en una memoria muy corta, de

¹ T. Bergman, *Meditationes de Systemate Fossilium Naturali: Nova Acta Regiae Societatis Scientiarum Upsalensis*, 4 (1784), 63-128.

² Torbern Bergman, *Commentatio de Tubo Ferruminatorio, eiusdemque uso, in explorandus corporibus praesertim mineralibus*. Vindobonae, 1779. Ioann. Paul.

³ Citado por J. A. Schufle, «Torbern Bergman, earth scientist», *Chymia*, 12 (1967), 59-97, especialmente p. 78.

sólo cinco páginas, y la tituló *Varias formas cristalinas que se deducen del espato calizo*⁴.

El trabajo llegó a interesar al célebre químico francés M. de Morveau, quien sugirió su traducción al francés. Fue entonces cuando Bergman, que no le había dado demasiada importancia al principio, se dedicó a revisar el original de 1773, ampliándolo hasta 23 páginas. La traducción se publicó en 1792⁵.

El trabajo, que había sido traducido al inglés, junto con otros varios, fue incluido en su *Physical and Chemical Essays*, publicado en 1784⁶, y fue considerado de tal importancia, que al aparecer la edición alemana de la *Cristalografía* de Romé de l'Isle, fue incluida como un apéndice a la obra⁷.

¿A qué se debía que dicho trabajo fuera considerado de tal importancia? Lo que había pasado era que Bergman, en su corto trabajo, había intentado relacionar por vez primera la estructura de los cristales con el hecho de la exfoliación. No se trataba de una mera indicación de la existencia del hecho, como hicieron Gassendi y Charleton, ni una explicación de una posible triangulación de los cristales, como la Hire había expuesto, sino que Bergman utilizaba la exfoliación para presentar una explicación plausible de, al menos, la truncadura. La idea básica de Bergman consistía en que la variedad sin fin de formas cristalinas que la calcita presenta en la naturaleza se podía deducir de una «forma primitiva» que obtenía por exfoliación. La idea le surgió por la observación de su discípulo

⁴ Torbern Bergman, «Variae crystallorum formae, a Spato ortae», *Nova Acta Regiae Societatis Scientiarum Upsalensis*, 1 (1773), 150-155.

⁵ Tobern Bergman, De la forme des cristaux et principalement de ceux qui viennent du spath (trad. de M. de Morveau). *Journal de Physique*, 40 (1792), 258-270.

⁶ Torbern Olaf Bergman, *Physical and Chemical Essays*; London, 1784, vol. 11, Dissertation XII: On the forms of crystals, particularly those of spathaceous kind, páginas 1-26.

⁷ *Versuch einer Crystallographie oder Beschreibung der, verschiedenen, unter dem Nahmen der Crystalle bekannten, Korpern des Mineralreichs eigenen, geometrischen Figuren, mit Kupfern und Auslegungs-Planen durch den Herrn de Romé Delisle. Aus dem Franzosichen übersetzt mit Anmerkungen und Zusätzen. Nebst...* Hn. Bergmans Abhandlung von Spathgestalten. Aus dem... Lateinischen übersetzt von Christian Ehrenfried Weigel. Greifswald, 1777. Tratado de Bergman, páginas 438-442. Citado en Göte y Johan Nordström Torbern Bergman's foreing correspondance. Almquist and Wiksell, Upsale, 1965, vol. 1, LVI + 466 pp.

Johan Gottlieb Gahn, quien accidentalmente había roto un escalenoedro «diente de perro» de calcita, viendo que el núcleo romboédrico que se obtenía de dicho cristal era idéntico al observado por Bartholinus en el espato de Islandia cien años antes. Con esta y otras observaciones similares, Bergman pudo obtener el prisma hexagonal, la forma dodecaédrica, las formas piramidales y otras propias de la calcita, utilizando dicho núcleo. El método que seguía consistía simplemente en adicionar a la superficie de un núcleo uniforme romboédrico capas delgadas, que él denominó *lamellae*, del mismo tipo y de diferente extensión. De esta manera pudo explicar la forma del cristal de calcita como sigue:

A veces se aplican planos, similares a los planos fundamentales, pero decreciendo según cierta ley; este decrecimiento, sea por falta de materia, lo que es más probable, o por alguna otra causa, debe necesariamente cambiar el aspecto de los planos terminales, y ocasionalmente aumentar o disminuir su número. Volvamos -dice Bergman- a la figura 1 y supongamos planos semejantes, pero continuamente decrecientes (Mp, Mg, Mt) aplicados al núcleo interno, terminarán últimamente en un vértice en ambos lados, de manera que, en vez de un prisma, tendremos una doble pirámide, la una dirigida hacia arriba, hacia abajo la otra⁸.

Es evidente que los ejes de las pirámides son tanto más largos cuanto más espacio decrezcan los rombos; y por el contrario... si el decrecimiento se para antes de que los lados últimos de los planos acumulados desaparezcan, se generan vértices truncados⁹.

En honor a la verdad, la teoría de crecimiento por aposición de planos materiales ya había sido avanzada por Steno. La novedad de Bergman residía en que el núcleo era único y precisamente el que se obtenía por exfoliación, como el propio Bergman dijo:

Si uno cualquiera imagina que esta teoría es puramente geométrica y especulativa, que examine con cuidado los cristales de calcita, su estructura discontinua, y que, si se rompe con cuidado y arte, mostrará completamente la estructura interna,

⁸ Bergman, *Physical and Chemical Essays*, vol. II, p. 4.

⁹ *Ibid.*, p. 5.

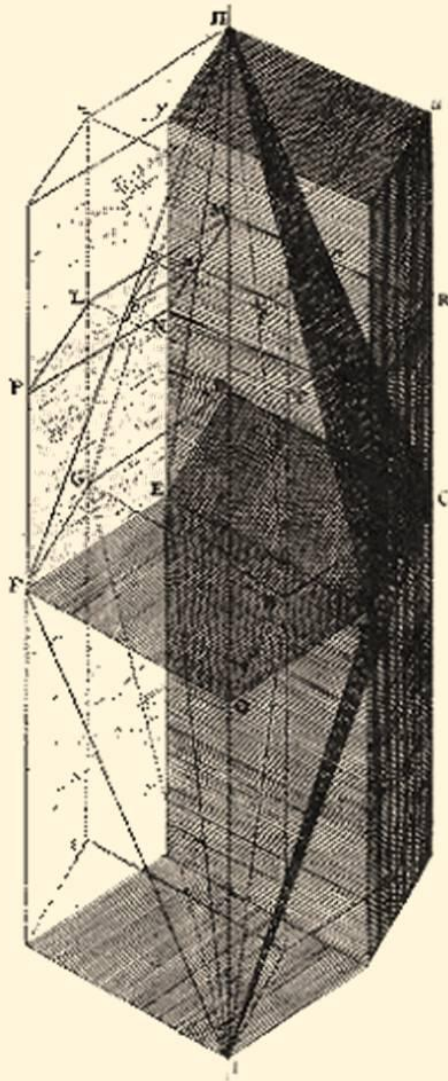


FIG. 30.- Núcleo romboédrico de la calcita de Bergman

y añadía en una nota,

Mi discípulo Dr. Gahn, primer observador del núcleo central en cristales piramidales de calcita ¹⁰.

A continuación, Bergman intentó extender su teoría sobre la morfología del cristal basándose en el crecimiento por aposición de lamellas alrededor de un núcleo de forma primitiva. Siguiendo probablemente las ideas de Cappeller, que Bergman cita en su trabajo, intentó reducir todo a pirámides. Su generalización era, con todo, muy primitiva:

Cualquier prisma puede formarse por dos bases con pirámides apropiadas, en número apropiado alrededor del mismo punto; y la base puede formarse por una pirámide sola, su ángulo vertical dirigido hacia afuera; de esta manera puede formarse un prisma de cuatro lados con bases similares ¹¹.

Cuando utilizaba pirámides, Bergman no tenía ideas claras sobre la homogeneidad del cristal, puesto que las pirámides no tenían por qué ser paralelas. Así, explica el cristal del jacinto de la siguiente forma:

(está formado por) cuatro pirámides hexagonales y seis tetragonales que coinciden en un punto, las primeras pueden fácilmente ser reducidas a seis tetraedros y las últimas a cuatro ¹²,

y para explicarlo mejor dio un dibujo adecuado. En este aspecto, Bergman no hacía más que seguir expresando lo que constituía el conocimiento aceptado de la época, y que hemos visto en la descripción de Mairan del cubo.

En este aspecto, Bergman era primitivo, y no se atrevió a extrapolar el caso de la calcita para dar lugar a una explicación general de la estructura de los cristales. Bergman reconoció, con

¹⁰ *Ibid.*, p. 9.

¹¹ *Ibid.*, p. 21.

¹² *Ibid.*, p. 19.

todo, que las «lamellas» no eran los bloques últimos que formaban el cristal, y no se atrevió a decidir si las «moléculas mínimas de la parte integrante» tenían forma geométrica, o si la morfología externa del cristal era simplemente el resultado del proceso de crecimiento. No obstante, se dio cuenta de que:

la cristalización es el efecto de atracción; y como toda la materia, incluidas las sales, está sujeta a las leyes de aquella atracción, no estamos autorizados a considerar la forma regular y simétrica como peculiar de cuerpos salinos¹³.

Bergman, pues, no tenía resuelta la duda que ya Vallerius ¹⁴ había tan sabiamente expuesto. Si, se pregunta Bergman, los cristales no son la consecuencia del poder formativo de la sal, es necesario buscar en la composición atómica la razón de la variedad de la morfología cristalina. Como químico que era, la composición química constituía, por lo tanto, el concepto útil y básico para el estudio de los cristales, puesto que:

los criterios externos -decía Bergman- no deberían abandonarse, pero aquel que implícitamente confiaba en ellos se engaña a sí mismo: pueden proporcionar a un observador experto, cierta ayuda, pero nunca pueden servir para determinar su seguridad ¹⁵.

La prematura muerte de Bergman nos ha impedido saber si su idea química era la acertada, o si hubiera cambiado de manera de pensar con respecto a la morfología del cristal, porque, en otra parte de Europa, había un científico que, convencido de la fuerza e importancia de la forma cristalina, iba a desarrollar la primera teoría de la estructura de los cristales. El lugar era París, y la persona el Abate René-Just Haüy (1743-1822).

¹³ *Ibid.*, p. 26.

¹⁴ Vallerius había utilizado la duda científica para combatir la idea de la sal como elemento cristalizador.

¹⁵ *Ibid.*, p. 10.

UNA VEZ MÁS LA EXFOLIACIÓN DE LA CALCITA: RENÉ-JUST HAÜY

Quizás haya pocas personalidades científicas que hayan influido más que René-Just Haüy en una ciencia determinada. En cristalografía, su influencia fue tanta, que durante su vida activa, toda la ciencia de los cristales giraba a su alrededor. Pero veamos quién era y qué hizo.

René-Just fue el primogénito de Just Haüy y de Madelaine Candelott, de Saint-Just. Un niño de dulce voz y buenas maneras, muy afectivo, disfrutaba en los cantos y ceremonias religiosas de su parroquia. Atraído por la piedad y vivacidad de espíritu del chico, el prior de la Abadía de Premonitores, cuando le hubo enseñado las primeras letras, urgió a sus padres a que llevaran a René-Just a París, para que pudiera aprender lo que el buen prior ya no podía enseñarle. Siguiendo estos consejos, alrededor de 1750, la familia Haüy se trasladó a la capital y el chico fue aceptado como niño de coro en la iglesia de San Pablo (Faubourg Saint-Antoine), donde permaneció hasta que tuvo unos trece años. Los protectores de Saint-Just lograron una beca para el chico en el Colegio de Navarra, donde pronto René-Just se distinguió por su aplicación y notas. Su piedad fue en aumento, y una vez terminados sus estudios en la Sorbona, en abril de 1764, decidió abrazar el sacerdocio, recibiendo las sagradas órdenes en 1770.

Durante su juventud, René-Just se dedicó a la botánica, gracias al influjo de uno de sus amigos de Saint-Just. Seis años después de ordenarse sacerdote, y gracias a sus conocimientos botánicos, entró en el Jardín Real. Allí tuvo la suerte de que un mineralogista de cierto nombre, Daubenton, diera unos cursos de mineralogía práctica, que René-Just escuchaba con interés. Desde aquel momento la mineralogía se convirtió para el joven sacerdote en una segunda vocación. ¿Por qué, se preguntaba René-Just, las plantas, las flores, los frutos y todas las partes orgánicas de la planta tienen una forma constante y compleja, y por qué los minerales tienen siempre una forma geométrica sencilla? A esta pregunta, Haüy había de darle una respuesta adecuada, repitiendo sin saberlo el mismo accidente que permitió a Bartholinus descubrir el fenómeno de la exfoliación, y que movilizó la mente hábil de Bergman.

El relato de su conversión a la ciencia de los cristales y el descubrimiento histórico ha sido narrado muchas veces. Pero para un libro de esta índole, quizás no existiera mejor narración que la que compuso el Barón de Cuvier, Secretario perpetuo de la Academia Real de Ciencias de París en su elogio ¹⁶ a Haüy, y que reproducimos a continuación.

Observando un día la muchedumbre que entraba a oír las conferencias de mineralogía de M. Daubenton, se unió a ella, y se alegró de encontrar una materia más acomodada que la botánica a su inclinación que había sentido por la física.

Pero el Jardín du Roi tuvo un gran número de estudiantes, y fueron numerosos los que oían a M. Daubenton, dejando la botánica y la mineralogía allí donde estaban. Quizás conocían mejor que Haüy este o aquel asunto, puesto que habían iniciado sus estudios antes que él; pero para ellos estas ciencias eran ya costumbre establecida y tan familiarizados estaban con sus dificultades, que no podían verlas. No fue éste el caso de Haüy, puesto que entró en estas ciencias tardíamente. Los hechos contrastantes, las oscuridades en el razonamiento excitaron inmediatamente su espíritu y se sumergió en un territorio desconocido para él. Se maravillaba por la constancia de las complicadas formas de las flores, los frutos y todas y cada una de las partes de los cuerpos orgánicos, y no pudo concebir que las formas de los minerales, aunque mucho más simples y geométricas, no pudieran ser reducidas a leyes similares; porque en aquel tiempo ni siquiera existía el semi-tratamiento que había ideado Romé de l'Isle en su segunda edición de su *Cristalografía*. ¿Cómo, pensaba Haüy, la misma piedra, la misma sal puede presentarse ahora en cubos, prismas o agujas, sin el menor cambio en su composición, mientras que una rosa tiene los mismos pétalos, el cedro la misma altura e idéntico desarrollo?

Con la mente llena de estas dudas, sucedió que un día examinando ciertos minerales en la casa de un amigo suyo, M. Defrance, tuvo la afortunada desgracia de dejar caer un bello grupo de cristales prismáticos de calcita. Uno de ellos se rompió, dejando ver en la superficie tan lisa como las caras externas, y que parecía de un cristal nuevo, totalmente diferente al del prisma. Haüy recogió el fragmento; examinó las caras, su inclinación

¹⁶ *Eloge historique de M. Haüy*, pronounced dans la seance publique de l'Academie Royale de Sciences, le 2 de juin 1823, par M. le Baron Cuvier, secrétaire perpétuel. *Memoires de l'Acad. Roy. Sciences* (París), VIII (1829). 154-178.

mutua, sus ángulos. Con gran sorpresa descubrió que era el mismo que se presenta en el espato romboédrico, el espato de Islandia.

Un nuevo mundo se le ofreció a su mente. Volvió a su despacho, y tomando un cristal de calcita cristalizada en una pirámide hexagonal, forma denominada diente de cerdo, intentó romperlo y nuevamente ve aparecer ante sus ojos este romboedro, este espato de Islandia. Las pequeñas piezas que se habían producido también eran pequeños romboedros. Rompe un tercer cristal de la especie llamada lenticularis, y nuevamente aparece el romboedro en el centro, y otros menores se producen. ¡Todo ha sido hallado! exclama: las moléculas de calcita tienen una forma idéntica, es por la agrupación de las mismas de manera distinta como surgen las formas tan variadas; y partiendo de esta idea, pudo imaginarse fácilmente las moléculas apiladas unas con otras y disminuyendo regularmente para formar nuevas pirámides, nuevos poliedros y cubrir el primer cristal como otro nuevo de tal manera que el número y disposición de las caras externas sea totalmente diferente del cristal original, debido a la manera como la distribución había afectado a este o aquel lado, en esta o en aquella proporción.

Si esta idea constituía el verdadero principio de la cristalización, no podía dejar de ser observable en cristales de otras sustancias; cada uno de ellos con sus moléculas constitutivas idénticas, todo ello teniendo un núcleo definido y una serie de capas, produciendo todas las variedades. M. Haüy no duda en romper su pequeña colección; los cristales que le dan sus amigos saltan hechos pedazos, bajo los golpes de su martillo. En todos los casos encuentra una estructura basada en la misma ley. En el granate, es el tetraedro; para la fluorita, un octaedro; en la pirita un cubo; en el yeso y el espato pesado aparecen prismas rectos de cuatro caras, pero cuyas bases tienen ángulos diferentes, aquellos de sus moléculas constitutivas; siempre los cristales se rompen según superficies paralelas a las caras del núcleo. Las caras externas se pueden concebir siempre como el resultado de un decrecimiento de estratos superpuestos, que decrecen más o menos rápidamente, y ello ocurre también en los ángulos y los vértices. Las caras nuevas no son nada más que pequeños peldaños o una serie de puntos producidos por el decrecimiento de los estratos, pero que parecen planas a la vista, debido a su pequeño tamaño. Ningún cristal era una excepción, y otra vez repite, ahora ya seguro: ¡Todo ha sido hallado!

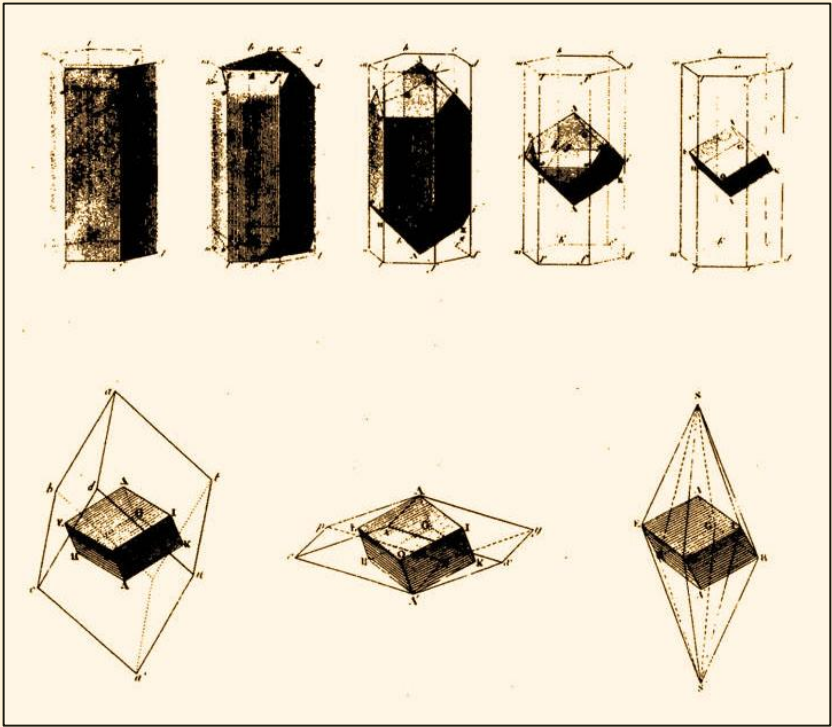


FIG. 31.- *El núcleo romboédrico de la calcita, según Haüy.*

La versión literaria de Cuvier relata sólo una parte de la historia y aún con ciertos errores. Por ejemplo, no está claro, históricamente, si el incidente de la caída del cristal fue real o no. Haüy, en efecto, sólo se refirió al hecho de que observó un cristal de calcita roto accidentalmente, como él mismo relató de la siguiente forma:

Observé que un cristal de esta misma variedad, que había sido separado por casualidad de un grupo, estaba roto de manera oblicua, de tal manera que la fractura mostraba una superficie limpia, y que tenía aquel brillo que es propio del pulido natural. Probé si era posible en el mismo prisma obtener nuevas fracturas según otras direcciones, y después de diferentes intentonas, pude obtener de cada lado del prisma tres secciones oblicuas, y a través de estos nuevos cortes, paralelos a los primeros, extraje en el centro del prisma, un romboedro perfectamente similar al del espato de Islandia ¹⁷.

El relato de Cuvier es exacto en cuanto se refiere a la procedencia del ejemplar que inició el proceso del descubrimiento en la mente de Haüy; no obstante, el relato literario parece indicar que todo el universo de la estructura de los cristales apareció diáfano para Haüy. El hecho es que el desarrollo de la teoría fue un proceso lento que puede ser seguido a través de los trabajos del propio Haüy. El mismo René-Just se dio cuenta inmediatamente de que necesitaba para formular la teoría la ayuda de las matemáticas. Desgraciadamente durante quince años se había dedicado a enseñar latín, olvidándose de otras disciplinas más importantes para su trabajo. Acuciado por esta necesidad evidente, con gran diligencia se entregó al estudio de la geometría, de la cual sólo tenía ideas muy superficiales o que había olvidado totalmente. Y no fue hasta el 10 de enero de 1781 cuando Haüy pudo presentar su primer trabajo a la Academie de Sciences de París, sobre la estructura del granate ¹⁸,

¹⁷ René-Just Haüy, *Essai d'une theorie sur la structure des cristaux, appliquée à plusieurs genre de substances cristallisées*, París, Gogué et Née de la Rochelle, Libraires, 1784. VIII + 236 pp., especialmente pp. 10-11.

¹⁸ R. J. Haüy, «Extrait d'une memoire sur la structure des cristaux de grenat», *Journal de Physic*, 19 (1782), 366-370.

R. J. Haüy, «Extrait d'une memoire sur la structure des spaths calcaires», *Journal de Physic*, 20 (1782), 33-39.

seguido de una teoría general de la estructura de los cristales. Ambos trabajos fueron muy bien recibidos en la Academia, logrando, gracias a ellos, ser nombrado miembro de la Academia por el Rey, el 15 de febrero de 1783.

Por otra parte, en el relato literario, no se indica en absoluto que las ideas de Bergman hubieran influido en la tesis de Haüy. El asunto ha sido ampliamente estudiado por Hooykaas y el lector puede consultar con provecho sus estudios ¹⁹. Que Haüy conoció los trabajos de Bergman es obvio, puesto que el propio Haüy lo confiesa:

Cuando empecé a estar interesado en el estudio de los cristales, tuve la ocasión de leer una memoria del Sr. Bergman sobre los cristales, que publicó en 1779... Fui atraído especialmente por la explicación que da para la calcita... Esta explicación es muy buena y de acuerdo completo con la naturaleza... Este autor ha añadido a su haber el honor de haber dado el primer punto de la visión satisfactoria de la estructura de los cristales ²⁰.

Como para indicar que lo cortés no quita lo valiente, en una nota Haüy hace constar la corta extensión del trabajo original de Bergman, e indica que las ideas añadidas posteriormente al trabajo

no tienen relación alguna con la forma en que yo imagino la cristalización.

Cuando comparamos el tratamiento superficial de Bergman con el trabajo detallado y profundo de Haüy, no podemos menos que estar de acuerdo con él cuando afirma que su teoría no fue en modo alguno una consecuencia de la opinión de Bergman, y explica por qué Haüy la dejó de lado, diciendo:

¹⁹ R. Hooykaas, «Torbern Bergman's crystal theory» *Lychnos* (Annual of Swedish History of Science Society), 1952, pp. 21-54.

²⁰ René-Just Haüy, «Essai d'une theorie sur la structure des cristaux, appliquée a plusieurs genre de substance crystallisées», París, Gougué et Née de la Rochelle, 1784, VII + 236, especialmente pp. 39-40.

era un esquema sencillo, trazado al paso, desde el mejor punto de vista de un mineralogista, pero donde uno reconoce la mano que ha trabajado con tanto éxito en el perfeccionamiento de las tablas de la química ²¹.

LA TEORÍA DE LOS CRISTALES

La posibilidad de extraer un núcleo romboédrico de un cristal de calcita motivó a Haüy a tratar de obtener núcleos similares de otras especies minerales. Él mismo nos relata esta parte de la historia:

Pruebas similares, llevadas a cabo en especies distintas, demasiado blandas para presentar una exfoliación clara, produjeron núcleos que tenían otra formas, pero cada una de ellas invariablemente constante para el mismo tipo de cristales. Entonces creí que estaba seguro... de poder establecer este principio general: que cada variedad del mismo cristal incluye como núcleo un cristal que tiene la forma primitiva y original de su género ²².

A este núcleo extraído por exfoliación, le dio el nombre de *forma primitiva*. Según Haüy sólo existían cinco tipos de formas primitivas, a saber:

el paralelepípedo, el octaedro, el tetraedro que es siempre regular, el prisma tetragonal, también regular, y el dodecaedro de caras rómbicas, todas iguales y similares ²³.

La posibilidad de extraer un núcleo de un cristal, por simples operaciones mecánicas, indicó a Haüy que todo el cristal debía estar formado por la yuxtaposición de unidades similares al núcleo, pero cuyo tamaño debía ser el menor que se podía alcanzar. En realidad,

²¹ Haüy, *Leçons sur la Physique*, Scéances École Normal de Paris, vol. 1 (1800), 309-310.

²² René-Just Haüy, *Essai d'une theorie sur la structure des cristaux, appliquée ti plusieurs genre de substances cristallisées*, París, Gogué et Née de la Rochelle, 1784, VIII, 236 pp., especialmente pp. 11-12.

²³ Haüy, *Traité*, vol. 1, p. 44.

dichos bloques últimos debían poseer la composición química del cristal, en otras palabras, debían ser las moléculas químicas que lo formaban. Estas moléculas, que él las concebía como la consecuencia de

suponer que la división mecánica del cristal se lleva hasta su límite extremo²⁴.

eran las *moléculas integrantes*, que según nuestro autor eran

los sólidos menores que se pueden extraer de un mineral sin alterar su naturaleza ²⁵.

Las moléculas integrantes eran, por consiguiente, los menores sólidos concebibles con una composición química determinada, y una forma geométrica específica. Las moléculas integrantes tenían la misma composición química que la sustancia que formaba el cristal, a pesar de lo cual, Haüy pensó que no tenían por qué ser idénticas a las moléculas del químico, que denominó para distinguirlas moléculas elementales o primarias.

En otras palabras, las moléculas integrantes eran múltiplos de las elementales. Además:

las formas de las moléculas integrantes participan de la diversidad que muestran los sólidos, que son su conjunto ²⁶.

El resultado de esta teoría era concebir el cristal como un apilamiento ordenado de moléculas similares, unidas por una cohesión, que Haüy equiparó a la afinidad química. Si el cristal estaba formado por moléculas integrantes y dichas moléculas parecían una forma específica y geométrica, entonces el problema principal que la cristalografía debía resolver era, según Haüy, el siguiente:

²⁴ Haüy. *Essai*, p. 25.

²⁵ Haüy. *Traité*, vol. 1, p.50.

²⁶ Haüy. *Traité*, vol. 1. p. 43.

Dado un cristal, determinar la forma precisa de sus moléculas constitutivas, su distribución relativa, y las leyes de la variación de las capas que han formado el cristal ²⁷.

En otras palabras, el problema crucial de la cristalografía consistía en explicar, a partir de la distribución molecular, la morfología cristalina, concebida como el resultado del crecimiento del cristal. Como la forma real de la molécula no era conocida, y la técnica experimental de su tiempo no estaba tan desarrollada que pudiera permitir lograrlo (el mismo Haüy era pesimista en cuanto a su posibilidad) la solución al problema era, sencillamente, extrapolar la forma primitiva macroscópica al campo microscópico, es decir, al campo molecular. La morfología cristalina debía explicarse utilizando conceptos sencillos, derivados de ella misma.

LA TEORÍA DE LOS DECRECIMIENTOS Y DE LA LEY DE LAS INTERSECCIONES RACIONALES

Como hemos visto, Haüy incluyó en el problema que la cristalografía tenía ante sí la necesidad de determinar «las leyes de la variación de las capas que forman el cristal». Para resolverlo, aplicó una serie de ideas lógicas que constituyen la teoría de los decrecimientos.

Haüy concibió que las formas cristalinas se producían por la agregación de capas de moléculas integrantes a un núcleo central. equivalente a lo que hoy aceptamos en la teoría del crecimiento cristalino. Según Haüy:

En la operación natural, un cristal. que empieza por un embrión, imperceptible a nuestros ojos, y en el cual los decrecimientos que se relacionan con la forma del cristal ya están indicados, crece por superposición de cubiertas que, en sucesión, mantiene el aspecto de la forma original; y en el resultado de la teoría, el cristal se supone originado por un

²⁷ Haüy, *Essai*, p. 25.

núcleo... y el material nuevo que se adiciona a este núcleo forma un conjunto de capas planas superpuestas unas a otras ²⁸.

Si esta es la forma según la cual opera la naturaleza, el nombre apropiado para denominar el hecho de hojas apiladas sería acreciones, o acrecimientos, pero Haüy prefirió usar la palabra más tradicional decrecimientos. Esta elección derivó no sólo de la historia de la teoría, sino en especial del hecho que Haüy era fundamentalmente un pedagogo. De esta manera pensó que empezar por el cristal completo y llegar al núcleo separando estrato por estrato, no sólo era más fácil de comprender, sino que era mucho más apropiado para la mentalidad del mineralogista, al cual Haüy se dirigía. El concepto de decrecimiento y sus tipos quedan claramente expuestos en los párrafos siguientes:

Es por sustracción de una o varias filas de moléculas, que pueden ser simples o compuestas, que el decrecimiento se produce en las capas que se añaden al núcleo. Se denomina *decrecimiento sobre las aristas* aquel según el cual la línea central (resultante de unir los centros de las moléculas integrantes) es paralela a las aristas de la forma primitiva; *decrecimiento sobre el ángulo* se presenta cuando dicha línea es según la diagonal, y *decrecimiento intermedio* aquel según la cual la dirección de la línea central está inclinada al mismo tiempo sobre la arista y la diagonal de la cara ²⁹.

Aplicando de manera regular uno de los tres tipos de decrecimiento se podía explicar siempre un tipo de cristal dado. La única regla que se requería en la teoría era la siguiente:

Las capas superpuestas llevan sus decrecimientos de tal manera que siempre mantienen figuras rectilíneas ³⁰.

Como la molécula integrante de una forma cristalina dada tenía una forma geométrica propia, y el decrecimiento operaba de manera específica de acuerdo con la regla anterior, se deducía que:

²⁸ Haüy, *Traité*, vol. I, p. 234.

²⁹ Haüy, *Traité*, vol. I. 58.

³⁰ Haüy, *Traité*, vol. I. p. 54.

el número de formas secundarias es necesariamente finito ³¹.

Haüy supuso que las formas secundarias eran las formas que presentaba un cristal además de la forma primitiva. Como aquellas se originaban siempre mediante la operación de decrecimiento,

Las caras secundarias no deben considerarse como planos geométricos, sino que están llenas de aquellas desigualdades, casi comparables a los peldaños de una escalera ³².

Esta idea la expresó Haüy en una serie de bellas figuras que ilustraron su *Traité de Cristallographie*, algunas de las cuales se han reproducido en esta obra. Según estas ideas, Haüy concibió las caras de un cristal como pirámides escalonadas, siendo aquellas el límite geométrico de las pirámides y de sus peldaños.

La teoría requería que los decrecimientos debían ser la consecuencia de sustraer una o varias filas de *moléculas integrantes* en los estratos sucesivos que formaban la cara del cristal, y, además, que el número de filas perdidas debía permanecer constante. O como el propio Haüy decía:

El efecto de un decrecimiento viene determinado por el valor con que difieren los estratos sucesivos que se superponen sobre la cara dada del núcleo, ya sea sobre sus aristas o sobre los ángulos de dicha cara ³³.

Haüy expresó la prueba de que la teoría era correcta de la siguiente manera:

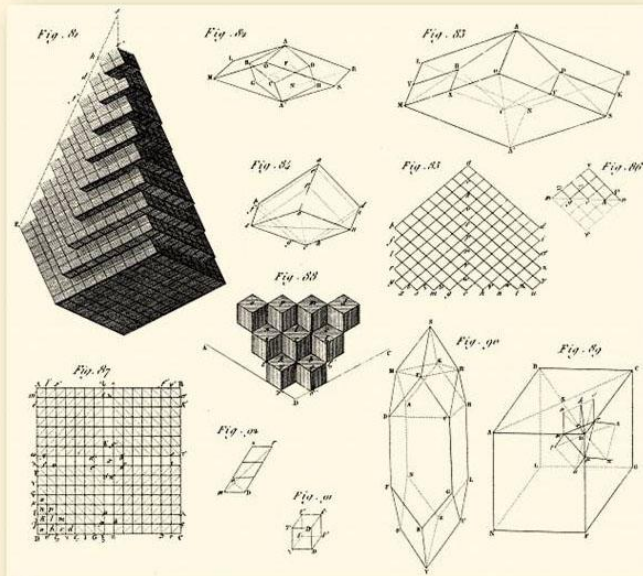
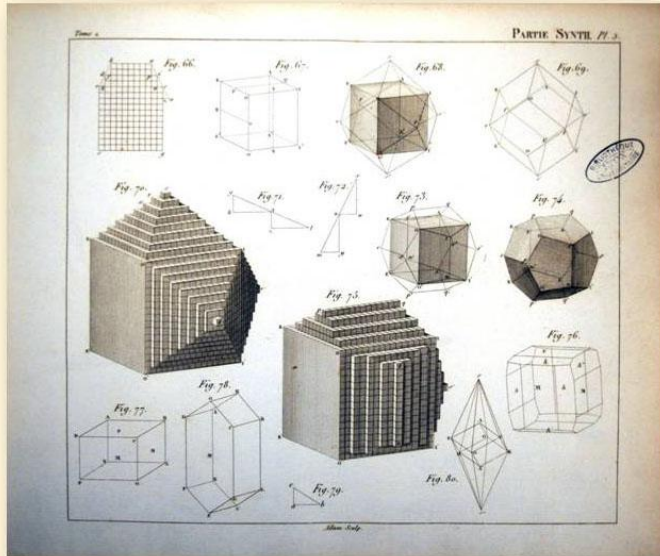
La existencia de las leyes que se han dado hasta aquí queda probada por el acuerdo entre el cálculo y la observación, porque los ángulos, sean planos o sólidos, del cristal, calculados a partir de dichas leyes, son los mismos que los medidos directamente sobre el cristal ³⁴.

³¹ Haüy, *Essai*. p. 75.

³² Haüy, *Essai*. p. 15.

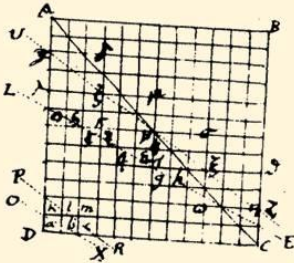
³³ Haüy, *Traité*, vol. 1, p. 196.

³⁴ Haüy, *Essai*, p. 23.



Modificado de FIG. 32.- *Ilustraciones de cristales y su estructura, de Haüy.*

10) L'autre mode de décrire nous eniga plus d'attention, pour être bien sûr. C'est pour ainsi dire le rec plus ultra des difficultés que présente l'étude de la cristallographie. Je vais vous l'exposer le plus clairement qu'il me sera possible.



— Concevons que des molécules intégrantes que je suppose, pour plus de simplicité, être d'une forme cubique, soient liées invariablement deux à deux, de manière à former, par leur réunion, de petits parallélogrammes doubles de ces molécules. Concevons de plus un développement dans lequel ces parallélogrammes forment une même forme que les molécules simples; si nous supposons toujours que ce carré représente une face d'un octaèdre cubique, son double rectangle de molécules simples, le rectangle composé de deux carrés a, b , sera la face extérieure d'une des molécules doubles dont je viens de parler, et les rectangles composés, l'un des carrés c, d , l'autre des carrés e, f etc. seront les faces extérieures d'autres molécules semblables, comprises dans une même rangée traversée par la ligne L E. On pourra supposer de même que les molécules soient liées trois à trois ou en plus grand nombre. Par exemple, si elles sont liées six à six, elles formeront des parallélogrammes semblables à ceux dont les faces extérieures sont représentées par les rectangles g, h, i, j, k, l, m, n etc. qui composeront une même rangée traversée par la droite U Z.

— Voici un modèle qui représente les plus simples des développements d'origine, c'est celui qui a lieu par une seule rangée de molécules doubles des unités.

FIG. 33.- Manuscrito de Hauy en el que desarrolla la racionalidad de parámetros.

La teoría de Haüy transformó la recién creada ciencia de la Cristalografía de una ciencia meramente descriptiva en una ciencia cuantitativa. Con ello la Cristalografía quedaba establecida como conocimiento científico.

MOLÉCULAS SUSTRACTIVAS

La teoría que Haüy había desarrollado podía aplicarse sin problemas en los casos en que el núcleo aislado en el cristal fuera paralelepípedo, por ejemplo, si era un cubo, un romboedro, un paralelepípedo rectangular y así sucesivamente. Pero, ¿cómo se resolvía el apilamiento de las formas primitivas cuando el cuerpo obtenido por exfoliación era un prisma hexagonal, un dodecaedro, un octaedro o un tetraedro? Para resolver el problema que él mismo encontró en la formulación de su teoría, Haüy introdujo el concepto de *moléculas sustractivas*. Consideremos el caso de un prisma hexagonal. Las secciones paralelas a cuatro de sus caras dividen el prisma original en seis prismas triangulares que tienen triángulos equiláteros como bases. De manera análoga, los planos paralelos a seis de las caras del dodecaedro dividen este sólido en 24 tetraedros, cuyas caras son triángulos isósceles idénticos.

Para poder construir el cristal, Haüy se vio precisado a asociar el prisma triangular por pares, para formar un prisma rómbico en el cual las caras prismáticas forman un ángulo de 120° . De manera semejante, se necesitaban seis tetraedros de los obtenidos a partir del dodecaedro, para formar un rombododecaedro. Haüy comprendió que necesitaba la asociación de varias moléculas integrantes para formar la unidad básica del cristal. Esta unidad múltiple la denominó «molécula sustractiva» de la sustancia y la definió como:

una unidad con la cual la teoría opera, sin relación alguna con la subdivisión que pueda tener lugar debido a las fracciones representadas por las moléculas integrantes ³⁵.

³⁵ Haüy, *Traité*, vol. 1, p. 52.

Sin embargo, y a pesar que la molécula sustractiva era un artificio necesario para la teoría, para obtenerla era necesario, por ejemplo, que sólo tres de los planos de exfoliación, de los seis que permite el prisma hexagonal, fueran activos. Cosa semejante ocurría en el caso del dodecaedro.

HOMOGENEIDAD CRISTALINA

Sea lo que fuere, Haüy llegó a la conclusión que siempre era posible definir una unidad de la materia con forma paralelepípedica que sirviera para construir el cristal por simple aposición y por repetición paralela de dicha unidad, sin discontinuidad. La teoría de Haüy era, en efecto, el primer intento con éxito, según el cual el cuerpo cristalino continuo que aparece a simple vista se sustituye por un modelo discontinuo que tiene en cuenta la naturaleza discontinua del sólido. El tremendo éxito que tuvo dicha teoría al explicar la morfología externa del cristal hizo que dicha idea fuera inmediatamente aceptada y de esta manera Haüy debe ser considerado como el primer gran cristalógrafo teórico. Sus ideas claras fueron comprendidas por todos y, debido a ello, la influencia de Haüy en el campo de la cristalografía científica, que él creó, puede bien compararse a la influencia de un Newton en el campo de la moderna física. Dicha influencia fue tan importante que sus ideas no sólo constituyeron la base del conocimiento durante su vida, sino que han perdurado, más o menos modificadas, en los tiempos que le sucedieron. Pero este aspecto de su vida será analizado en otra parte de este libro; lo que nos interesa indicar aquí es que Haüy fue el autor de una piedra fundamental del edificio de la cristalografía, específicamente que el cristal está formado por la agrupación paralela de unidades paralelepípedicas idénticas. Esta idea constituye lo que hoy conocemos como principio de la homogeneidad cristalina.

La idea de la repetición paralela de bloques idénticos en el cristal fue fundamental y sobre ella se basó la idea de las redes cristalinas que Bravais había de desarrollar en 1850. Haüy no llegó a dicho concepto, pero se dio cuenta de la existencia en el cristal de filas de moléculas periódicamente distribuidas, al decir que:

las moléculas, sean simples o compuestas, se dice que forman una fila cuando el centro de sus caras externas se halla sobre la misma recta. Si las moléculas son simples, dos casos satisfacen esta condición; en el primer caso, la línea que pasa por sus centros, y a la cual he dado por sencillez el nombre de línea central, es paralela a una de las aristas de la forma primitiva... En el otro caso, la *línea central* es paralela a una de las diagonales de la cara... formando también una fila ³⁶.

Es curioso que Haüy, que había utilizado implícitamente la idea, nunca se refirió a la existencia de la periodicidad como propiedad fundamental del cristal. Este concepto es el que precisamente iba a servir para desarrollar el concepto de redes cristalinas. Pero, para ello, la ciencia de los cristales debía esperar varios decenios más.

LA LEY DE SIMETRÍA

Un hecho de observación es la existencia de caras con un mismo desarrollo en el cristal. No podía menos Haüy que intentar una explicación del fenómeno. Su explicación fue, con todo, meramente fenomenológica, y no una genética basada en la existencia de unos elementos de simetría, que Haüy no supo reconocer en su verdadero valor. Haüy se redujo a indicar la existencia de aristas idénticas en la forma primitiva, y las consecuencias que dicha identidad tenía en el desarrollo de las formas cristalinas.

Haüy formuló dos principios que, según él regulaban la operación de los decrecimientos. Estos dos principios eran:

1. Si entre las aristas idénticas que existen en una forma primitiva una sufre un decrecimiento de un valor dado o permanece sin modificar, todas las demás, imitándole, sufrirán el mismo decrecimiento o permanecerán sin modificación.
2. Si dos aristas o ángulos sólidos son diferentes, puede suceder que sigan dos decrecimientos diferentes, o que uno de ellos venga afectado por un decrecimiento dado, mientras que el otro queda

³⁶ Haüy, *Traité*, Vol. V, p. 73.

libre del mismo. No existe dependencia necesaria más que en el caso que una arista represente a todas las demás ³⁷.

Estos dos principios, que para Haüy constituían su llamada *ley de simetría*, fueron condensados en formas más legibles por el propio autor en otra parte de su obra, de la forma siguiente:

Un decrecimiento dado se repite en todas aquellas partes del núcleo que tienen la característica de poderse sustituir entre sí cuando al cambiar la orientación del núcleo en relación con la dirección de la mirada, no cesa de mostrarse de la misma manera. He dado a estas partes el nombre de idénticas ³⁸.

y seguidamente aclara qué entendía por idéntico:

Dos aristas son idénticas cuando tienen la misma longitud y cuyas caras, por cuya intersección aparece la arista, están igualmente inclinadas sobre ella ³⁹.

Tal como Haüy describió su ley de simetría nos aparece como una intuición más que como una ley científica auténtica. Incluso cuando utilizó la palabra «imitando» Haüy reconocía que la ley de simetría por él descubierta era de naturaleza metafísica. Los cristalógrafos pronto se iban a dar cuenta que la simetría era algo real en el cristal, libre de contextos metafísicos y de su estudio se llegó al descubrimiento de todas las simetrías posibles en los cristales. Pero este descubrimiento constituyó un dilatado campo de actividad que se extendió durante todo el siglo XIX, tal como se verá en capítulos más avanzados de esta obra. El problema de la simetría era mucho más complejo que lo que Haüy en su tiempo podía prever y que no podía resolver una simple intuición aunque fuera genial.

³⁷ Haüy, *Traité*, vol. V, p 72.

³⁸ Haüy, *Traité*, vol. I, p 196.

³⁹ Haüy, *Traité*, vol. I, p 196.

EL CASO DE LA TURMALINA

La ley de simetría, tal como Haüy la concibió, adolecía de un defecto fundamental que bien pronto hubo de presentar dificultades a su propio creador. Haüy partió de la idea puramente geométrica de la identidad de aristas y vértices de la forma primitiva, y de acuerdo con dicha identidad geométrica, los decrecimientos que las afectan habían de ser idénticos. Según la ley de simetría, y debido a que todas las formas primitivas eran paralelepípedicas la existencia de decrecimientos iguales hacía que todos los cristales debían ser centrosimétricos. El problema surgió cuando Haüy quiso analizar los cristales de turmalina, cuyo extraño comportamiento térmico y eléctrico hemos analizado en un capítulo anterior.

Los cristales de turmalina presentan un desarrollo de caras de tal tipo que implica la no existencia: de un centro de simetría, pues, a pesar de formar prismas hexagonales, el desarrollo morfológico de los extremos opuestos de dicho prisma eran diferentes. Siguiendo su método de exfoliaciones, Haüy determinó que la forma primitiva de la turmalina era un romboedro, encontrándose que si quería explicar la morfología del cristal, debía admitir que los decrecimientos que habían operado en uno u otro extremo eran diferentes. Como Haüy estaba convencido de que su ley era cierta, buscó la explicación de este hecho de observación en el comportamiento extraño que la turmalina tenía frente al calor.

Aquí -decía Haüy- la cristalización ha sido alterada por una causa externa de la manera como hubiera procedido si se le hubiera dejado a sí misma. Ello es debido a la influencia que las fuerzas eléctricas tienen en la producción de las aristas de este mineral que debiera atribuirse a la diferencia de configuración que representa los ápices de estos cristales, que son al mismo tiempo las partes en las cuales se localizan las acciones opuestas de los polos que adquiere el cristal por la acción del calor ⁴⁰.

Al echar la culpa al campo eléctrico del cristal, Haüy seguía operando con la idea subjetiva que un principio metafísico era más importante que una ley objetiva. Para él la morfología de la

⁴⁰ Haüy, *Traité*, vol. 1, p. 214.

turmalina era «anómala», y una anomalía se debía a una causa extrínseca, la electricidad. Haüy no supo ver que la morfología del cristal no era un concepto puramente geométrico, sino que tenía una base física determinada por la estructura. Este hecho había de constituir uno de los grandes descubrimientos que los cristalógrafos y en especial Curie hicieran durante el siglo XIX.

CRECIMIENTO DE CRISTALES Y OTRAS CUESTIONES

La morfología de los cristales era un campo mucho más complejo que lo que «debía ser», tal como la ley de simetría requería. Para paliar algunos de los problemas que la observación presentaba, Haüy supuso correctamente que las impurezas o la naturaleza de la solución tenían una influencia decisiva en la variación de la morfología de los cristales.

Cuando las moléculas integrantes de un mineral, suspendidas en un líquido, tienden a unirse para formar el cristal, estas moléculas, al mismo tiempo que están forzadas por su atracción mutua, deben sobrepasar la del líquido que actúa reteniéndolos, por consecuencia la fuerza que actúa para unirlos se mide por el exceso de su atracción sobre el líquido ⁴¹.

Otra causa de la variación (de la morfología) es la influencia de moléculas extrañas disueltas en el mismo líquido, y cuya fuerza se añade a la del líquido, compensando en parte la atracción mutua de la materia agregada en el cristal ⁴².

También intuyó nuestro autor que las diferentes partes de un cristal, es decir, las caras, aristas y vértices ejercían influencias diferentes a la adición de material nuevo al edificio cristalino que crece en una solución. Hoy sabemos que ello es debido a la llamada energía de adición, pero Haüy, con su gran intuición, lo visualizó de manera análoga, tal como se ve claramente en el siguiente párrafo:

⁴¹ Haüy, *Traité*, vol. 1, p. 236.

⁴² Haüy, *Traité*, vol. 1, p. 237.

La atracción ejercida por el líquido, que se opone a la reunión de las moléculas en los ángulos del núcleo, es mayor que la que actúa sobre las moléculas que se dirigen al centro de las aristas, y esta supera la que el líquido ejerce sobre las moléculas centrales ⁴³.

Esta explicación, que Haüy elaboró, está de acuerdo con la solubilidad de los cristales, que es más rápida en los vértices y aristas, que en las caras bien desarrolladas.

Como hemos indicado, la teoría de Haüy se basaba en la existencia real o potencial de unas exfoliaciones en el cristal, puesto que eran estas exfoliaciones las que determinaban la elección de la forma primitiva. Sin embargo, existen minerales en los cuales existe más de un conjunto de exfoliaciones, y por tanto, la elección de la forma primitiva es ambigua en estos casos. La explicación que dio Haüy, en realidad, no era otra cosa que la aceptación de la posibilidad de la existencia de exfoliaciones *supernumerarias* que:

son siempre paralelas a caras posibles por decrecimiento ⁴⁴.

Haüy, como muchos otros de su tiempo, fue un seguidor de la teoría corpuscular de la luz, e interpretó los cuerpos transparentes en función de las ideas aceptadas en su época, que se remontaban, al menos, a la época del descubrimiento de la doble refracción de Bartholinus, unos 150 años antes.

Como tendremos ocasión de ver en un capítulo próximo, los años justamente precedentes al de la publicación de su *Traité* (editado en 1822) marcaron una época de gran actividad en el campo de la óptica cristalina. A pesar de ello, Haüy tan moderno en otros aspectos, seguía manteniendo ideas anticuadas. Por ejemplo, hablando de los materiales transparentes dijo:

Aceptamos que los rayos de luz deben pasar en todas las direcciones de los cuerpos que tienen esta propiedad sin que su paso se evite, de lo que hemos de concluir que las moléculas de estos cuerpos dejan entre sí intervalos incomparablemente mayores que sus diámetros, para que puedan

⁴³ Haüy, *Traité*, vol. 1, p. 239.

⁴⁴ Haüy, *Traité*, vol. 1, p. 244.

ofrecer paso libre en todas direcciones al fluido luminoso. La analogía indica que lo inverso debe acontecer en los cuerpos opacos, en relación a la distancia mutua entre sus moléculas ⁴⁵.

Haüy que falleció precisamente en dicho año, nunca tuvo ocasión de darse cuenta de la importancia revolucionaria que tenían los experimentos de Malus, y las interpretaciones de Young y de Fresnel. Se entiende, por tanto, que Haüy no llegara a comprender, nunca el valor de la birrefringencia, que describió pero no explicó.

FÓRMULAS REPRESENTATIVAS DE LOS CRISTALES

La teoría de Haüy era sencilla y racional: se necesitaba tan sólo determinar la forma primitiva a partir de las exfoliaciones, y aplicar decrecimientos diferentes a las aristas y a los vértices del paralelepípedo primitivo. Si el método era sencillo y lógico, se podría introducir una escritura simbólica que describiera, sin ambigüedad, la morfología de un cristal dado. Haüy, consciente de esta necesidad, propuso unas fórmulas condensadas que deben tomarse como el principio de lo que, con el devenir del tiempo, han constituido los símbolos de caras y aristas. La idea era sencilla:

Sólo se precisa dar letras a los ángulos y aristas de la forma primitiva, y añadir a estas letras números que indican las leyes de decrecimiento que tales ángulos o aristas muestran, el resultado de los cuales son una forma secundaria ⁴⁶.

El método que Haüy desarrolló fue, con todo, complicado, y pocos, a parte del propio autor, pudieron utilizarlo con éxito. Haüy utilizó las cuatro primeras vocales A, E, I, O, para referirse a los cuatro vértices superiores de la forma primitiva. Las seis primeras consonantes B, C, D, F, G, H, las utilizó para indicar las seis aristas superiores de la forma primitiva. Los decrecimientos se indicaban por números; así el 2 indicaba que faltaban dos filas en el

⁴⁵ Haüy, *Traité*, vol. 1, p. 248.

⁴⁶ Haüy, *Traité*, vol. 1, p. 258.

decrecimiento, y así sucesivamente. El problema surgía cuando el decrecimiento se producía según una diagonal, y Haüy lo resolvió cambiando de lugar el número correspondiente. Así, O^2 , indicaba que existía un decrecimiento de 2 paralelo a la diagonal de la base P, pasando por el ángulo E, y así sucesivamente.

Si a esto se añade que los decrecimientos podían ser en longitud (anchura del peldaño) o en altura (salto del peldaño) se comprende que la nomenclatura se hiciera muy complicada. Con todo, Haüy tuvo el acierto de llamar la atención sobre la necesidad de establecer una nomenclatura racional que permitiera reconocer la morfología del cristal sin representarlo, aunque en su obra el propio Haüy utilizó con profusión dibujos de cristales, costumbre ya iniciada por Romé de l'Isle, y que constituyó desde entonces una necesidad para el desarrollo de la ciencia de los cristales.

8. LA GRAN CONTROVERSIA

¿ESTABA HAÜY EQUIVOCADO?

El trabajo de Haüy fue una obra maestra desde el punto de vista de elegancia y simplicidad. El impacto de su teoría fue tan decisivo que su autor fue considerado inmediatamente como el padre de la cristalografía. Era un momento de alegría y no nos puede extrañar que Buffon se atreviera a decir «todo es conocido». Muy pronto, sin embargo, se levantaron voces que no estaban satisfechas con todo lo que Haüy había dicho. Concretamente había un punto en su teoría, que los hechos iban a indicar, que si no era incorrecto, al menos no era siempre correcto. Según Haüy:

A cada sustancia específica de composición química definida, capaz de existir en una forma cristalina, le corresponde una forma que es específica y característica de esta sustancia.

Este postulado de su teoría había de iniciar, en vida de Haüy, un debate que no terminó hasta su muerte. El debate se resolvió, no sin gran resistencia, por el descubrimiento que llevó a cabo un químico desconocido. Este químico encontró dos hechos nuevos de la realidad del cristal: la existencia del isomorfismo, esto es, la posibilidad de formas cristalinas iguales en sustancias químicas diferentes, y el

fenómeno del polimorfismo, es decir, la posibilidad de que una misma sustancia química se presente en formas cristalinas que pertenecen a simetrías diferentes.

EL PROBLEMA DEL ARAGONITO

El primer golpe contra la teoría de Haüy provino del descubrimiento de un mineral abundante en Molina de Aragón (España), que Romé de l'Isle había descrito en su *Cristallographie* como una variedad de calcita ¹.

El mineral, al que Werner dio el nombre de aragonito de acuerdo con su origen, no tenía mayor significado. En realidad, el cristal rojizo era tal vez interesante para el coleccionista por su apariencia en columnas hexagonales, en grupos o aisladas, aunque sus caras nunca eran cristalográficamente perfectas. Además, el mineral no tenía importancia económica. ¿Por qué, pues, este humilde mineral había de convertirse en el centro de una gran controversia?

El problema surgió cuando el análisis de Klaproth mostró que, en efecto, la composición del aragonito era la misma que la de la calcita ², de acuerdo con lo que había dicho de L'Isle. Klaproth dijo incluso que el aragonito debía ser descrito como una variedad de calcita producida, no porque las partes constituyentes fueran diferentes, sino porque su asociación era diferente. La mera posibilidad de que el carbonato cálcico pudiera dar origen a dos especies minerales diferentes era difícil de aceptar. En efecto, según Haüy, una especie mineral era:

una colección de cuerpos naturales cuyas moléculas integrantes son similares y formadas por los mismos elementos unidos en la misma proporción ³.

¹ *Cristallographie*, 2, edición 1783, vol. 1, p. 517.

² Ver Andreas Arzruni, *Physikalische Chemie der Krystalle*, Braunschweig Friedrich Vieweg u. Sohn, 1893, X + 365 pp., especialmente p. 25.

³ *Traité de Minéralogie* (1801), vol. 1, p. 162.

Su teoría requería además que:

Cada especie mineral se distingue de todas las demás por una forma de moléculas integrantes que pertenecen a ella exclusivamente ⁴.

La especificidad de la molécula integrante para una especie química dada era un concepto básico, y como la morfología y la simetría era el resultado de la agregación regular de estas moléculas integrantes, se deducía que una especie química dada debía tener una simetría específica. Si el aragonito tenía la misma composición que la calcita, entonces ambos debían tener la misma simetría. Ya que ambas especies tenían simetrías distintas, la consecuencia era que su composición química debía ser diferente. Debido a ello, numerosos químicos franceses y alemanes intervinieron con el fin de llevar a cabo análisis químicos cuidadosos del modesto aragonito.

El problema fue atacado con miras amplias y con el sincero deseo de encontrar si era o no posible para una misma sustancia química tener formas primitivas diferentes.

Entre los diferentes autores que entraron en la lid, quizás el más significativo fue el trabajo de Thenard y Biot ⁵, publicado en 1809, pero presentado en el Instituto en 1807. La razón del trabajo era que, en opinión de sus autores, los análisis químicos sólo habían dado una alta posibilidad de que el aragonito y la calcita tuvieran la misma composición química, pero que no existía certidumbre para afirmarlo. Su análisis dio la prueba necesitada, prueba que fue comprobada además por la ayuda de los índices de refracción. Su conclusión fue doble:

- 1º. que el aragonito y la calcita tienen la misma composición química,
y
- 2º. que los mismos principios químicos pueden, uniéndose en las mismas proporciones, originar compuestos que tienen propiedades físicas distintas, debido ya sea a la posibilidad de una distribución

⁴ Ver Arzruni, p. 24.

⁵ Thernard y Biot, *Sur l'analyse comparée de l'aragonite et du carbonate de chaux rhomboïdal, avec des expériences sur l'action que ces substances exercent sur la lumière*. Mémoires de Physique et de Chimie de la Société d'Arcueil. Facsimil. Johnson Reprint Corporation. New York, 1967, vol. II, pp. 176-206.

de dichas unidades de formas distintas, o a través de la influencia de un agente transitorio que desaparece después sin destruir la combinación.

Esta afirmación contiene en sí la posibilidad del fenómeno del polimorfismo tal como se entiende hoy en día. Sin embargo, la cuestión no estaba resuelta, pues Haüy rechazó el problema diciendo que se trataba de «un efecto sin causa, que la razón rechaza». En favor de Haüy apareció el análisis de Stromeyer de 1813, que encontró cantidades variables de carbonato de estroncio en aragonitos de diferentes localidades. Pero el mismo Haüy hubo de reconsiderar, después de un estudio comparativo de la cristalografía de la estroncianita y del aragonito, que sus similitudes «no sólo estaban desautorizadas por los hechos observados, sino que estaban fuera de cualquier posibilidad»⁶.

El problema que el aragonito y la calcita presentaron se amplió después al darse cuenta los mineralogistas que la anatasa era dióxido de titanio con la misma composición que el rutilo y que ambas presentaban simetrías diferentes. Además se descubrieron dos modificaciones del bisulfuro de hierro, la pirita y la marcasita. Un discípulo de Haüy, Laurent-Pierre Dejussie, decía a este respecto:

Parece razonable que difieran, si no por las cualidades y relaciones de sus principios, al menos por funciones relativas de dichos principios⁷.

La controversia continuó por una serie de años, y nuevos mineralogistas y químicos intervinieron en ella; la historia es demasiado larga y sin interés para la finalidad de este libro y no merece un relato completo y detallado. La controversia fue resuelta finalmente en 1821 por el químico alemán Eilhard Mitscherlich (1794-1863), pero esto requiere un tratamiento especial.

⁶ Haüy, *Comparaison des formes cristallines de la strontiane carbonatée avec celles de l'arragonite*, Ann. Chem. Phys., S (1817), 439-441.

⁷ L.-P. Dejussieu, *Journ. des Mines*, 30 (1811), 240 (citado por Arzruni).

EL CASO DE LOS CRISTALES MIXTOS: ISOMORFISMO

El problema del isomorfismo, aunque no había sido formulado específicamente era ya conocido. Basilius Valentinus, un alquimista del siglo XV, había ya indicado que mezclas de vitriolos diferentes cristalizaban con formas de uno de ellos, hecho que también conoció Henkel (1679-1744). Fue, sin embargo, Romé de l'Isle el primero en describir en su *Cristalographie* que mezclas de vitriolo de cobre y vitriolo de hierro cristalizaban con formas del último. Estos autores no fueron en modo alguno los únicos que observaron el fenómeno de los cristales mixtos. Un químico francés, Nicolás Leblanc (1742-1806) observó que muchos sulfatos se combinaban en cualquier proporción y que la forma de sus cristales variaba según las proporciones de sus componentes, dando lugar a dos tipos de cristales diferentes ⁸. Resultados similares fueron obtenidos por Vauquelin (1763-1829) y Bernhardi (1774-1859). La investigación seria del problema se debió, sin embargo, a un discípulo de Haüy, François Sulpice Beudant (1787-1850), que investigó «mezclas químicas de asociaciones no mecánicas en proporción indefinida» y las consecuencias que dichas mezclas tenían en la morfología final de sus cristales ⁹. Beudant, a pesar de todo, todavía decía que:

Aún no se ha visto jamás un mismo compuesto que se presente en dos sistemas cristalinos diferentes, y las composiciones químicas que son esencialmente diferentes nunca han dado cristales que sean realmente similares ¹⁰.

Beudant estaba interesado en estudiar hasta qué límites un compuesto químico podía aceptar partículas ajenas sin cambiar el sistema cristalino al cual pertenece. Citó dos hechos principales:

⁸ N. Leblanc, «Essai sur quelques phénomènes relatifs à la cristallisation de sels neutres», *Journal de Physique*, 28 (1786), 296-345.

⁹ F. S. Beudant, «De la Cristallotechnie ou Essai sur les phénomènes de la cristallisation », *Journal de Physique*, 55 (1802), 295-345.

¹⁰ F. S. Beudant, «Recherches sur les causes qui peuvent faire varier les formes cristallines d'une même substance minérale», *Ann. Chem. Phys.*, 8 (1818), 5-52.

- a) un compuesto químico puede aceptar elementos extraños y, a veces, en grandes proporciones, sin cambiar su sistema cristalino, y
- b) Existen grupos en los cuales un compuesto, aun en pequeñas cantidades, puede dar su sistema cristalino a otras sustancias.

Como explicación de sus observaciones, Beudant introdujo la idea de las mezclas químicas de proporciones variables. Como surgieran ciertas críticas sobre sus investigaciones, dicho autor atacó al año siguiente el problema de la modificación de la forma cristalina de la sustancia desde un punto de vista general exhaustivo.

En este trabajo se trataba de investigar las causas de la variación del hábito de los cristales, que los minerales muestran de manera notoria. El programa de su investigación era demasiado ambicioso para él solo. En efecto, planteó investigar el efecto de diversas variables en las composiciones de cristalización, así como la influencia de mezclas mecánicas en dichas operaciones. Entre los puntos específicos de su investigación, Beudant estaba interesado en el problema de las sales dobles y su influencia mutua cuando se combinaban en relaciones variables. Concluyó diciendo que:

Siempre que varias sales puedan dar mezclas químicas, esto es, sin entrar en combinaciones definidas, se obtiene siempre para la sal cuyo sistema cristalino es dominante, formas específicas que difieren de aquella que presenta la sal cuando es pura.

No estaba claro que cuando se refería a la forma específica se refiriera sólo al hábito o a la «forma primaria» del cristal. El descubrimiento del isomorfismo y con él el descubrimiento de los cristales mixtos se le escapó. Esto fue en cierto modo trágico, puesto que Beudant tenía en su poder toda la evidencia necesaria para deducir: y formular el nuevo fenómeno. La tragedia residió no en que Beudant fuera incapaz de reconocer la realidad del isomorfismo, sino, como él mismo explicó, que:

Consideraciones personales, ajenas a la ciencia, me obligaron a decidir a no publicarlo nunca ¹¹.

¹¹ Beudant, *Ann. Chem. Phys.*, 14 (1920), 326-335, especialmente p. 331.

Esta consideración personal se refería a la influencia de Haüy, contrario a reconocer error alguno en su teoría.

MITSCHERLICH, BERZELIUS Y HAÜY: LAS DOS CARAS DE UNA
MONEDA

Berzelius, el gran químico sueco, era el ídolo de la generación joven de químicos. Acababa de iniciar la nueva química que había de revolucionar la industria química en la Europa central durante el siglo XIX. Entre los numerosos ayudantes que fueron atraídos por este hombre dinámico y creativo fue Eilhard Mitscherlich (1794-1863). Mitscherlich ¹², que contaba entonces veinticinco años de edad, estaba trabajando en el problema de las sales dobles, su química y cristalización, en la Universidad de Berlín. A su regreso a Suiza, y después de una larga estancia en Francia, Berzelius, en otoño de 1819, pasó por Berlín, donde conoció al joven químico, interesándose vivamente por su investigación. Tan interesado estaba Berzelius por el trabajo de Mitscherlich que logró del ministro prusiano de Cultura, Altemstein, un discípulo de Klaproth, una pensión del Estado prusiano que facilitó el viaje a Suecia de Mitscherlich para que trabajara con él.

Mitscherlich, lleno de impaciencia, no podía esperar a la concesión de este viaje, y escribió dos cartas a Berzelius, que son importantes para nuestra historia, puesto que contienen las primeras observaciones que condujeron al descubrimiento del isomorfismo. Así podemos leer:

Cuando mezclo una parte de vitriolo de cobre con dos partes de sulfato de mercurio, de zinc, y de níquel, obtengo una triple sal donde el oxígeno del óxido al oxígeno del agua está en relación de 1 : 6, y tiene la cristalización del vitriolo de hierro, con los mismos ángulos... Con el sulfato amónico, el sulfato de manganeso, de cobre, cobalto, níquel, hierro, zinc y

¹² J. L. Amorós, «Notas sobre la Historia de la Cristalografía». I. «La controversia Haüy Mitscherlich», *Bol. R. Soc. Esp. Hist. Nat.*, 57 (1969), 5-30.

potasio forman sales triples que tienen las mismas formas cristalinas. (Carta del 7 de noviembre de 1819.)

No puedo desechar la idea que me viene después de cada experimento que de la unión de formas cristalinas diferentes se desarrolla una forma que puede ser calculada de las cristalizaciones reunidas. (Carta del 28 de noviembre de 1819.)

En diciembre de aquel año Mitscherlich finalmente se trasladó a Estocolmo, donde publicó sus descubrimientos en el Journal de la Academia de Ciencias Químicas. Berzelius, orgulloso del éxito de su nuevo estudiante, escribió a su viejo amigo Haüy una larga carta en abril del año siguiente, que entre otras cosas decía:

El Sr. Mitscherlich, un joven químico alemán, está trabajando en este momento conmigo. Es muy trabajador y está determinando las formas de las sales cristalizadas, con mucha mayor precisión de lo que se ha hecho hasta hoy en día. Ha llegado a resultados muy interesantes en relación entre la composición y la forma. Sus experimentos muestran inmediatamente lo que usted ya ha indicado, que un compuesto dado no puede tener dos formas. Sin embargo, también ha encontrado que entre las sustancias que parecen ser simples existen muchas que se pueden sustituir entre sí, sin cambiar su forma siempre que los otros principios constitutivos permanecen constantes y en la misma proporción... El Sr. Mitscherlich ha comprobado un gran número de sustancias, pero como siempre teme equivocarse, en algún punto, está llevando a cabo continuas repeticiones gracias a lo cual considera ahora su descubrimiento completamente demostrado... Un nuevo campo se abre frente a nosotros, percibimos un tipo totalmente nuevo de sustancias que aun preservando la regularidad de sus formas, pueden variar en cuanto a los elementos que los constituyen se refiere, dentro de ciertos límites, sin que esta variación venga determinada por una afinidad química y sin seguir proporciones químicas, derivando sólo de la simple circunstancia que estas sustancias diversas puedan integrarse en la misma forma cristalina.

Berzelius estaba impaciente por hacer conocer a Haüy inmediatamente el descubrimiento del isomorfismo. No obstante, Haüy no quedó tan impresionado por una idea que contradecía uno de sus postulados. Haüy tenía más fe en su cristalografía y sus métodos que en las ideas «brillantes» de una persona que siendo

químico no era para él un cristalógrafo. Es en esta línea de pensamiento que podemos entender la contestación de Haüy el 13 de julio de 1820:

Puedo ver la posibilidad de reconciliar los principios de las dos ciencias, recuerdo que el Sr. Gay-Lussac ha expresado una opinión que tiene algo que ver con lo que el Sr. Mitscherlich ha encontrado, es decir, que las consecuencias que él sacó no son teorías de los resultados de la cristalografía... Espero para tomar una posición final hasta que el Sr. Mitscherlich publique los resultados de su bonita e importante investigación.

Pero Berzelius estaba seguro que Mitscherlich estaba en lo cierto, y nuevamente en el otoño de aquel año volvió a escribirle. La carta queda sin contestación por casi un año. En realidad Haüy había estado enfermo y tuvo una excusa para no contestar a su viejo amigo, que acababa de ser elegido miembro de la Academia de Ciencias de París. Durante este año Haüy sin duda había meditado los problemas que provocaba el intruso. Mientras tanto, el trabajo de Mitscherlich había sido publicado ya en Francia. Finalmente el 18 de octubre de 1831 Haüy se decidió a contestar:

En tanto se refiere al Sr. Mitscherlich admiro en él sus méritos como químico. Sin embargo, debo decir que he sido forzado a reexaminar una serie de hechos que aparecen en su trabajo publicado el año pasado. Los resultados de este examen han sido verificados por gentes de gran habilidad. Le puedo asegurar que entre los experimentos en que se basa, no existe uno sólo en el cual el Sr. Mitscherlich no se haya grandemente equivocado. Identifica formas cuyos ángulos muestran diferencias hasta 10° , formas que son incompatibles en el mismo sistema, pero cuyos motivos han de ser especies diferentes. Me parece que no ha tenido en cuenta la división mecánica ni las dimensiones de las formas primitivas. La geometría es una ciencia para ser creída, tal es la razón para rechazar a aquellos que hacen decirle otras cosas de las que dice.

La reacción de Haüy hacia Mitscherlich no era de simple desacuerdo en terreno científico, sino que, desde el punto de vista del

joven químico era de odio. Quizás algo de esto fuera cierto, pues pocos meses antes de morir ¹³ Haüy había comentado:

Si el descubrimiento de Mitscherlich fuera cierto, la mineralogía sería la ciencia más desgraciada.

La razón de su odio residía en el hecho que los nuevos descubrimientos atacaban en sus fundamentos la teoría monolítica de los cristales tal como la había desarrollado Haüy. El padre de la cristalografía cometió un error fundamental al no reconocer que su teoría era simplemente una teoría, basada en los hechos que su autor había utilizado. A pesar de que Haüy fue un científico genial, olvidó que la ciencia no es el producto de una persona sola, sino el resultado acumulativo de las contribuciones de personas distintas con ideas diversas y a menudo contradictorias.

LOS DESCUBRIMIENTOS DE MITSCHERLICH: POLIMORFISMO E ISOMORFISMO

¿Por qué las nuevas ideas irritaban tanto al anciano Haüy? Para tener una idea clara de la originalidad del trabajo de Mitscherlich vale la pena examinar con cierto detalle los trabajos de dicho autor. El primero, titulado *Sobre la relación que existe entre forma cristalina y proporción química* ¹⁴ fue publicado en 1820, pero leído en la Academia de Ciencias de Berlín el 9 de diciembre de 1819. Es en este trabajo donde describe la identidad de diferentes sustancias de formas químicas, pero formadas por igual número de átomos. Como prueba de su tesis, citó varios ejemplos, tales como:

El fosfato y el arseniato de sodio, el fosfato y el arseniato de amonio, el persulfato y el perarseniato de amonio, así como el persulfato y perarseniato de bario, contiene cada par, el mismo volumen de ácido, de base, de agua de cristalización y cada par tiene la misma forma cristalina.

¹³ Haüy murió el 1 de junio de 1822.

¹⁴ E. Mitscherlich, «Sur la relation qui existe entre la forme cristalline et les proportions chimiques», *Ann. Chem. Phys.*, 14 (1820), 172-190.

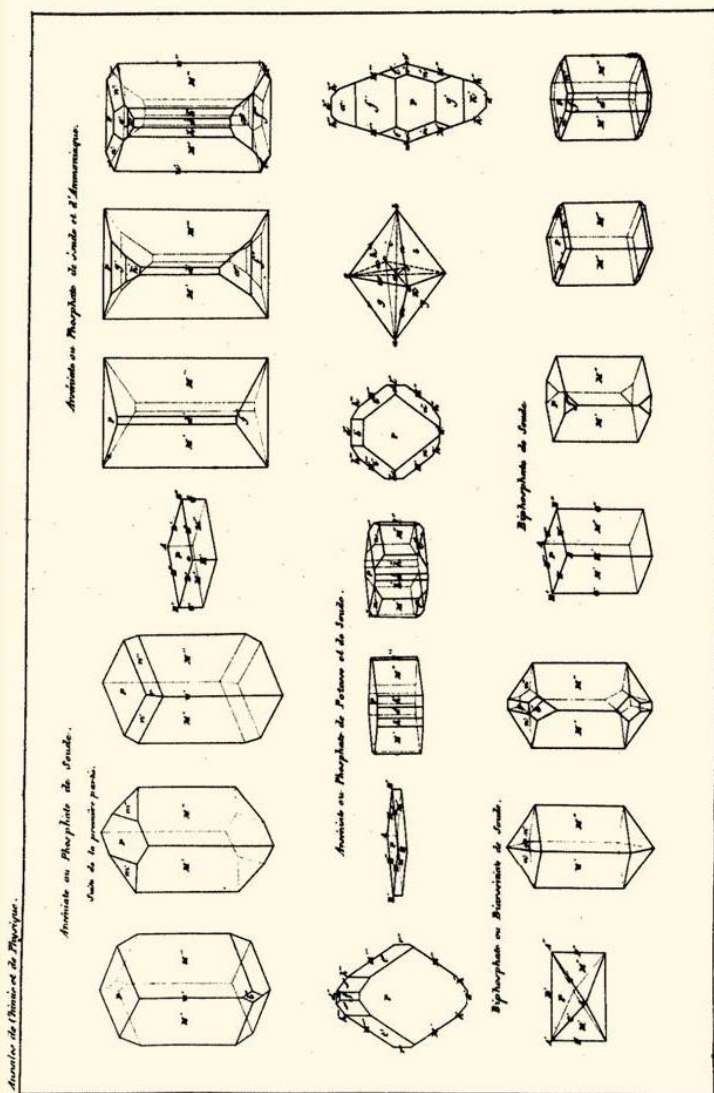


FIG. 34.-Una de las ilustraciones de Mitscherlich sobre isomorfismo y polimorfismo.

Otros ejemplos incluyeron los sulfatos de manganeso y cobre, sulfato de hierro y cobalto, y los sulfatos de cinc, níquel y magnesio y otros varios. Indicó que:

No sólo la forma primitiva, sino también todas las variedades eran tan similares en dimensión, número de caras y valor de sus ángulos, que era totalmente imposible encontrar diferencia alguna.

El trabajo contenía alguna inexactitud que provocaría la reacción de Haüy, quien eligió no contestar directamente sino a través de un estudiante suyo, anónimo, que reflejara sus puntos de vista ¹⁵. La contestación era dogmática, y realzaba la inexactitud de las medidas, no la sustancia del trabajo. La respuesta citaba, por ejemplo:

El método mineralógico se basa en el principio de que cada especie se distingue de todas las demás por una forma de moléculas integrantes que le pertenecen exclusivamente. Esta forma viene determinada por el resultado de la división combinada con relación de dimensiones que derivan de las leyes de estructura de la que resultan las formas secundarias.

La crítica terminaba con el comentario:

Todas las sustancias recientemente descubiertas o estudiadas... han mostrado moléculas de formas específicas.

El experto en sales dobles, Beudant, entró también en la discusión con una carta a Gay-Lussac ¹⁶, uno de los editores de los Anales. El valor de la carta reside en el hecho en que si bien aparentemente era una crítica del trabajo de Mitscherlich, de hecho apoyaba sus puntos de vista. La carta contenía la memorable frase: «consideraciones personales, ajenas a la ciencia, me hicieron no

¹⁵ «Réflexions sur la Mémoire de M. Mitscherlich concernant l'identité de la forme cristalline dans plusieurs substances différentes», *An. Chim. Phys.*, 14 (1820), 305-308.

¹⁶ «Lettre de M. Beudant a M. Gay-Lussac, sur la Mémoire de M. Mitscherlich», *Ann. Chim. Phys.*, 14 (1820). 326-335.

publicar los resultados en seguida», que ya hemos citado. Beudant expresó también ideas en apoyo de Mitscherlich, tales como

Con respecto a estos compuestos (sulfatos dobles) obtuve hace algún tiempo resultados similares a los que Mitscherlich se refiere... He estudiado 11 sales y estoy seguro que por lo menos 7 de ellas tienen formas idénticas.

Al siguiente año, Mitscherlich publicó su trabajo fundamental ¹⁷ en que definió átomos isomórficos y sustancias isomórficas. Dijo que:

Ciertos elementos diferentes, combinados en el mismo número con uno o varios elementos, muestran la misma forma cristalina y los elementos químicos pueden ser clasificados, en general, de esta manera en grupos. Denomino *isomórficos* los elementos que pertenecen al mismo grupo (pg. 351).

Mitscherlich pensó, por consiguiente, que el isomorfismo era una consecuencia de agrupar átomos isomórficos. Consideró no sólo la sustancia de formas idénticas (isomorfismo *sensu stricto*), sino también los casos en los que los átomos isomórficos producían pequeñas variaciones en la morfología del cristal pensando que la naturaleza química de los átomos que se sustituían explicaba el efecto observado. En realidad,

He observado hasta ahora formas cristalinas que resultaban de átomos distintos sin considerar la naturaleza química de estos átomos... No creo que me equivoque al aceptar que la naturaleza química de estos cuerpos isomórficos, que, en general y en todas sus combinaciones análogas, producen la misma forma cristalina debe ser la causa que determina en ciertos casos pequeñas diferencias en los ángulos, aunque los cristales aún pertenezcan al mismo sistema cristalino y muestren las mismas modificaciones (p. 379).

Mitscherlich apoyó su idea con una serie de fosfatos y arseniatos que analizó y sobre sus cristales midió los ángulos. Asimismo dibujó

¹⁷ E. Mitscherlich, «Sur la relation qui existe entre la forme cristalline et les proportions chimiques. 2nd Mémoire sur les arsénates et les phosphates», *Ann. Chim. Phys.*, 19 (1821), 350-419.

dichos cristales. Sobre la base de toda esta evidencia Mitscherlich anunció su importante ley:

El mismo número de átomos combinados de la misma manera producen la misma forma cristalina; y la misma forma cristalina es independiente de la naturaleza química de los átomos y viene determinado sólo por el número y posición relativa de los átomos (p. 419).

La ley reconocía la naturaleza atómica de los cristales y que dicha naturaleza era la única responsable de la morfología del cristal. También mostraba, implícitamente, que para comprender la naturaleza de los cristales se necesitaba primero el conocimiento de las posiciones relativas de los átomos, esto es, lo que hoy conocemos como su estructura cristalina.

El isomorfismo no fue su único descubrimiento. En efecto, en el mismo trabajo citó que el bifosfato sódico podía presentar cristales cuyas formas primitivas eran diferentes. En un caso la forma primitiva era un octaedro regular, mientras que en el otro se trataba de un prisma recto de base rómbica. Relacionando su descubrimiento con la existencia del aragonito y de la calcita y otros minerales conocidos, Mitscherlich anunció su segundo descubrimiento:

En general, la misma sustancia compuesta por los mismos elementos, combinados en las mismas proporciones, pueden presentar dos formas distintas siempre que circunstancias específicas ejerzan una influencia en el acto de la cristalización. Este fenómeno se puede explicar de manera sencilla por la teoría corpuscular. Si las posiciones relativas de los átomos que forman un cristal se cambia por cualquier circunstancia, la forma primitiva no permanecerá la misma (página 415-416).

Mitscherlich dio más tarde el nombre de *dimórfica* a la sustancia que presentaba el fenómeno que había descubierto. El número de sustancias dimórficas naturales y artificiales fue en aumento, y el fenómeno quedó establecido como una propiedad general de las sales. También mostró que la temperatura era un efecto determinante del

tipo de la forma primitiva de una sustancia dada ¹⁸. Algunos años más tarde, concretamente en 1828, Mitscherlich pudo decir que:

Se deduce de este fenómeno, así como de muchos otros que he hecho conocer, que las partículas aisladas de la materia en un sólido pueden ocupar posiciones relativas diferentes de la original sin que el cuerpo formado por ella se transforme en fluido ¹⁹.

A partir de entonces el cristal dejó de ser considerado como un cuerpo inerte, sino más bien como un cuerpo dinámico cuya estructura depende de la temperatura. Más tarde, se demostró que la presión era otro de los factores determinantes. El hecho importante fue señalar que los cambios polimórficos se producen en los sólidos manteniendo su solidez, y que la transformación implica un cambio en la disposición espacial de las partículas elementales que constituye las especies químicas. El estudio de los cristales necesitaba el conocimiento de su estructura no sólo para explicar el polimorfismo, sino también para entender las propiedades físicas del cristal, como veremos en otros capítulos de este libro. Los cristalógrafos entendieron esta necesidad y trataron de resolver el problema con los medios apropiados.

¹⁸ Mitscherlich, «Über das Verhältniss der Krystallform zu den chemischen Proportionen», *Abhand. Akad. Wiss.*, Berlín (1822-23), 43-48.

¹⁹ Mitscherlich, «Sur les formes cristallines et la composition des sulfates, des sélénates et des chromates», *Ann. Chim. Phys.*, 38 (1828), 54-56, especialmente p. 66.

9. LA GEOMETRIZACION DEL CRISTAL

LAS LECCIONES DE LA GEOMETRÍA ANALÍTICA

Cuando apareció en 1822 el *Traité de Cristallographie* de Haüy, el estudio de los cristales había ya tomado una dirección distinta, no en Francia, donde la influencia de Haüy era considerable, sino al otro lado del Rhin, especialmente gracias al trabajo de Weiss. Este nuevo enfoque del estudio de la morfología cristalina fue consecuencia directa de la tendencia que había transformado la geometría en geometría analítica. Para comprender mejor la labor de Weiss y de sus seguidores es conveniente en este momento indicar, aunque sea brevemente, lo que los géómetras habían llevado a cabo en su ciencia.

Se puede afirmar que la geometría analítica fue iniciada por Descartes en el siglo XVII, método que lo aplicó al estudio de curvas y figuras geométricas trazadas en un plano que servía para la mejor representación de las mismas. Con este fin Descartes introdujo un sistema, corriente en la ciencia actual, que se conoce como las coordenadas cartesianas. Como se sabe, el sistema cartesiano consiste en utilizar dos rectas perpendiculares entre sí como ejes coordenados, que tienen un origen común y que se divide en unidades de idéntica longitud. El método de Descartes no fue un hecho aislado en la historia de la ciencia. La necesidad de un sistema de coordenadas en un espacio de tres dimensiones fue sugerido no sólo por Descartes, sino por Pierre de Fermat (1601-1665) y Philippe de la Hire (1640-1718), de quien ya hemos hablado en otra parte de este libro. Con todo, el sistema de tres planos

perpendiculares cuyas intersecciones forman los ejes rectangulares del sistema coordenado se debió a Johann Bernouilli (1667-1748). El trabajo de estos matemáticos y otros varios que vivieron en el siglo XVII sirvió de base para que Leonhard Euler (1707-1783) pudiera desarrollar una teoría sistemática en el capítulo 5º del Apéndice del segundo tomo de su *Introductio*, publicada en 1748¹.

Euler utilizó un sistema de tres coordenadas formado por tres ejes x, y, z mutuamente perpendiculares, que tomó con la siguiente orientación con respecto al observador: el eje x se dirigía hacia el frente, el eje y hacia la derecha, y el eje z hacia arriba en la dirección vertical. Con este sistema de referencia, Euler podía representar cualquier curva en un espacio tridimensional. La importancia de la labor de Euler deriva de la solución que él dio al problema de la transformación de un sistema coordenado x, y, z en otro x', y', z' , cuyos ejes no tienen la misma orientación que el primero y que no deben tener necesariamente el mismo origen. La solución de Euler, de extrema sencillez, consistía en utilizar tres ángulos ϕ, ψ y θ , que tienen el significado siguiente: primero consideró la intersección del plano $x'y'$ con el plano xy . A esta línea la llamó *línea nodal*. Una vez definida esta línea, el ángulo ϕ es el-ángulo que el eje x forma con la línea nodal, medido en el plano xy ; el ángulo ψ es el ángulo que forma dicha línea nodal con el eje x' , medido en el plano $x'y'$, y el ángulo θ es el ángulo que forma el eje z con el eje z' , medido en el plano zz' . Para el caso general, en el que el nuevo centro coordenado tiene las coordenadas x_0, y_0, z_0 en el sistema antiguo, Euler dio las siguientes ecuaciones:

$$\begin{aligned} x &= x+x'(\cos \psi \cos \phi - \cos \theta \sin \psi \sin \phi) \\ &\quad - y'(\cos \psi \sin \phi + \cos \theta \sin \psi \sin \phi) \\ &\quad + z'(\sin \theta \sin \phi), \\ y &= y+x'(\sin \psi \cos \phi + \cos \theta \cos \psi \sin \phi) \\ &\quad - y'(\sin \psi \sin \phi - \cos \theta \cos \psi \sin \phi) \\ &\quad - z'(\sin \theta \sin \phi), \\ z &= z+x'(\sin \theta \sin \phi + y' \sin \theta \cos \phi + z' \cos \theta). \end{aligned}$$

¹ Leonhard Euler, *Opera Omnia*, Orell Fussli (1921-68). (1), 9.

Estas ecuaciones, que se conocen como ecuaciones de Euler, iban a tener extraordinaria importancia en la ciencia de los cristales al permitir el estudio formal de la simetría de los cristales, pues este estudio es básicamente el análisis de la invariancia frente a un cambio de ejes. Pero este aspecto de la cuestión no pareció inmediato a los cristalógrafos; de lo que sí se dieron cuenta fue que para estudiar con propiedad los cristales era necesario definir primero un sistema coordenado al cual referir las caras del cristal, siguiendo lo que la geometría analítica enseñaba.

EL ORIGEN DE LA CRISTALOGRAFÍA GERMANA

Como hemos indicado, el protagonista del cambio de rumbo en el estudio de los cristales fue Christian Samuel Weiss (1780-1856), profesor ordinario de Física en la Universidad de Leipzig.

Samuel Christian Weiss nació el 26 de febrero de 1780 en Leipzig. En esta misma ciudad estudió Medicina en su Universidad, doctorándose en 1800, cuando sólo tenía veinte años de edad. Su estancia en la Universidad de Leipzig tuvo la feliz circunstancia para él de coincidir con Friedrich Schelling, uno de los más entusiastas seguidores de la *Naturphilosophie*, movimiento que se extendió por Alemania durante el final del siglo XVIII y principios del XIX. Schelling era un crítico de las ideas de Haüy, propugnaba el sentido de la individualidad en los seres naturales y mantenía el concepto de fuerzas polares como las fuerzas activas en la Naturaleza. Todas estas ideas influyeron grandemente en el joven Weiss, que era polifacético en sus intereses intelectuales. Una vez alcanzado el doctorado en Medicina, Weiss se trasladó el siguiente año a Berlín, donde atendió las conferencias que Dietrich Karsten daba sobre mineralogía. En Berlín, Martin Klaproth estaba desarrollando el análisis cuantitativo de los minerales, y Leopold van Buch (1774-1852) fundaba las ideas nuevas de una geología no werneriana. Todo ello interesó al joven Weiss. Dos años más tarde se trasladó a Freiberg para estudiar mineralogía con Werner, que estaba en plena madurez. Durante su estancia en Freiberg preparó, bajo la dirección de su profesor Karsten, la traducción al alemán del *Traité de*

Minéralogie de Haüy, que acababa de aparecer. La traducción se publicó en Leipzig en 1804, conteniendo un largo artículo debido a la pluma de Weiss titulado *Visión dinámica de la cristalización*, en el que incluía las ideas de las fuerzas polares de Schelling, y fuerzas repulsivas. La idea más importante que Weiss introdujo en su artículo fue la naturaleza direccional de la cristalización, es decir, el concepto que hoy se denomina anisotropía.

Al año, tradujo Weiss el *Traité élémentaire de physique*, de Haüy, demostrando con estas dos traducciones que Weiss estaba bien al corriente del pensamiento del padre de la cristalografía. Ahora ya no le faltaba más que ir a Francia, y Weiss planeó partir de 1805 un largo recorrido de tres años por Alemania, su tierra natal, Austria, Suiza y finalmente Francia, que visitó dos veces en el año 1807, quedando en París hasta agosto de 1808. Pero la actitud autoritaria de Haüy y la atmósfera de sometimiento a las ideas del padre de la cristalografía eran demasiado para la mente libre de Weiss, y pronto el mismo Haüy le hizo saber que había perdido su confianza en él. Weiss mantenía ideas que en aquel entonces parecían opuestas a las de Haüy, pero que hoy se ve que no eran más que mutuamente complementarias. Dichas ideas las expuso de manera coherente en su tesis *De indagando formarum crystallinorum caractere geometrico principalis* que leyó Weiss una vez tomada posesión del puesto de Profesor de Física en la Universidad de Leipzig, en agosto de 1808. A dicha tesis siguió inmediatamente *De caractere geometrico principali formarum crystallinarum ortaëdricarum*, que publicó también en Leipzig en 1809.

El primero de ambos trabajos tuvo importancia suma, pues en él se desarrollaba un nuevo enfoque del estudio de los cristales, basado en el análisis de su forma geométrica externa. Esta idea dio origen, con el pasar del tiempo, y debido a la contribución de otros autores germanos a la llamada cristalografía germana, diferente en sus fundamentos de la de Haüy. El crecimiento de las ideas nacionalistas al principio del siglo XIX en Europa central jugó un papel importante en la separación entre ambas escuelas cristalográficas. A ellas se añadiría una tercera, la inglesa. La existencia de estas escuelas fue altamente beneficiosa para nuestra ciencia al promover una sana competición entre ellas. Como resultado de este estado de

cosas, la ciencia de los cristales cobró un desarrollo inusitado en direcciones y líneas de trabajo, las más variadas durante todo el siglo XIX. El resto de este libro narra esta parte de la gran aventura de los cristales.

EL SISTEMA DE LOS EJES CRISTALINOS: LOS SISTEMAS DE CRISTALIZACIÓN

El primero y quizás el éxito más importante de Weiss fue la selección de ciertos ejes de magnitud e inclinación definidas por la propia inclinación de las caras en la forma del cristal. Ya Haüy había introducido la idea de que siempre era posible en un cristal elegir una línea con respecto a la cual las caras de la forma primitiva se presentaban simétricas. Haüy denominó a esta línea el eje del cristal.

Weiss se dio cuenta que sobre cada cara de una forma simple, idéntica a lo que en la nomenclatura de Haüy era la forma primitiva, podían trazarse unas ciertas líneas, que pasando por el centro del cristal, las caras de la forma quedaban distribuidas de forma simétrica. Weiss denominó a estas líneas ejes del cristal. Weiss utilizó para nombrar estos ejes las letras *a*, *b* y *c*, nomenclatura que ya es tradicional en cristalografía. Al elegirlos no utilizó la convención que los geómetras utilizan, sino que siguiendo a Euler tomó el eje *b* hacia la derecha del observador, mientras que el eje *a* lo dirigió hacia el observador. El tercer eje, el eje *c*, lo tomó en la dirección corriente en geometría. Esta elección ha sido conservada en la nomenclatura cristalográfica, quedando consagrada en el estudio de los cristales.

También se dio cuenta Weiss que la naturaleza misma de la geometría del cristal le obligaba a no seguir exactamente la idea empleada en geometría analítica, según la cual el sistema coordenado era rectangular y de dimensiones iguales. Los cristales eran de naturaleza mucho más general de lo que había previsto la lógica matemática, y, por lo tanto, los ejes del cristal, para servir de ejes de referencia, habían de ser consistentes con las necesidades propias impuestas por el cristal mismo. Dicho de otra manera, el sistema de referencia al cual el propio cristal debía referirse debería ser natural,

es decir, un sistema consistente con las distintas formas cristalinas y su desarrollo. Al elaborar esta idea, pronto se vio que podía definir una serie de sistemas cristalinos, basados en la existencia de formas cristalinas diferentes que necesitaban ejes con dimensiones y direcciones específicas. Weiss llegó a esta importante conclusión operando sobre una serie de consideraciones que, a pesar de parecerle lógicas, eran totalmente antinaturales. El punto de arranque era que:

las formas regulares aparecen tantas veces en la naturaleza y en tan diversos cuerpos, que parecen ser el fin general y el tipo de todas las cristalizaciones ²

Partiendo de esta idea, y tratando de acomodar todas las formas a las regulares, ideó Weiss una serie de transformaciones que partiendo del cubo llegara a un prisma triclínico, pasando por los demás tipos de cristales. En el trabajo que publicó ³ en la Academia de Ciencias de Berlín, señalaba Weiss de manera perfectamente clara su filosofía:

Cuando se buscan las divisiones naturales de los diferentes sistemas de cristalización en la variedad de las bases elementales de las formas y sus núcleos, cuando la igualdad y la desigualdad de todas las posibles diferencias se indican por medio de subdivisiones, es entonces cuando encontramos que el sistema regular, frente a los sistemas no regulares, es el punto de arranque mejor para el desarrollo de las divisiones naturales de los sistemas de cristalización ⁴.

Para Weiss el primer sistema era, por supuesto, el regular o sistema esferoide, caracterizado por:

² Weiss, *Ibid.*, p. 355. De Indagando.

³ C. S. Weiss, *Uebersichtliche Darstellung der verschiedenen natürlichen Abteilungen der Krystallisation systeme*. Akad. d. Wissens, Berlín, Abhandlugen Phys. (1814-15), 290-336.

⁴ C. S. Weiss, *Ibid.*, p. 290.

Tres dimensiones iguales y mutuamente perpendiculares; o hablando más físicamente: igualdad de comportamiento en estas tres dimensiones ⁵.

A partir de este sistema, variando las dimensiones de sus ejes y alterando su ortogonalidad, Weiss dedujo los demás sistemas de la siguiente manera:

Los sistemas de cristalización que derivan del esferoídico o sistema equiáxico ya descrito se basan en si, como en el regular, tienen también tres dimensiones mutuamente perpendiculares, pero no todas ellas iguales; o están formados por dimensiones no mutuamente perpendiculares.

El primero comprende: a) aquel que de las tres dimensiones mutuamente perpendiculares dos de ellas son iguales, pero el tercero es diferente estos son los sistemas de cristalización tetragonales (*viergliedrigen*, en la nomenclatura de Weiss); y b) aquellos cuyas tres dimensiones mutuamente perpendiculares son diferentes. Esta división comprende el sistema rómbico (*zwei-und-zweigliedrigen*), el monoclinico (*zwei-und-eingliedrigen*) y el triclínico (*ein-und-eingliedrigen*) ⁶.

Finalmente, Weiss consideró también el caso de una «dimensión principal a la cual son perpendiculares otras tres mutuamente iguales», que constituían el sistema hexagonal, con dos grandes subdivisiones: la *sechsgliedrigen* y la *drei-und-drei-gliedrigen*, que corresponden al hexagonal propiamente dicho y al romboédrico, respectivamente.

En el sistema regular distinguió nuestro autor dos subsistemas, que también denominó sistemas, según los cuales los cristales presentaban todas las caras de la forma fundamental desarrolladas (sistema homosferoídico) o que sólo la mitad de las caras se desarrollan (sistema hemisferoídico). Toda esta información la condensó Weiss en una tabla que tenía la inconsistencia de incluir la perpendicularidad de ejes en los sistemas monoclinico y triclínico.

La idea de la existencia de sistemas cristalinos ya había sido avanzada por Johann Jacob Bernhardi (1774-1850), profesor de Medicina de la Universidad de Erfurt, y director de su jardín Botánico. Bernhardi había dicho:

⁵ C. S. Weiss, *Ibid.*, p. 291.

⁶ C. S. Weiss, *Ibid.*, p. 305.

Cuando se quieren deducir las formas unitarias más verosímiles y en número el menor posible analizando todas las cristalizaciones conocidas con criterios únicos, aquellas se pueden reducir a seis, a saber: 1) el cubo; 2) el romboedro; 3) el cuadroctaedro; 4) el romboctaedro; 5) el octaedro romboidal inclinado, y 6) el octaedro romboidal triplemente inclinado ⁷.

Estas formas básicas, definidoras de los sistemas, fueron las mismas que Weiss, un año después de Bernhardt, utilizaba en sus sistemas de cristalización. Por esta razón, y como ambas soluciones son idénticas, el esquema general se conoce como los sistemas cristalinos de Bernhardt-Weiss.

Los sistemas cristalinos fueron ideados, como se ha dicho, en función de las longitudes de estos ejes y su inclinación mutua. Así se definió el sistema cristalino como:

la colección de formas diferentes que tienen ejes en número, dimensiones y direcciones iguales ⁸.

y los sistemas quedaron definitivamente de la siguiente manera:

1. El primer sistema, o sistema regular, caracterizado por tres ejes de la misma clase y mutuamente perpendiculares.
2. El segundo sistema, caracterizado por cuatro ejes, tres de los cuales eran de la misma especie, a 60° entre ellos; el cuarto eje de clase distinta y perpendicular a los otros tres.
3. El tercer sistema, caracterizado por tres ejes mutuamente perpendiculares, de los cuales uno tiene dimensiones distintas.
4. El cuarto sistema, caracterizado por tres ejes mutuamente perpendiculares de tipo distinto.
5. El quinto sistema, caracterizado por tres ejes de tipo distinto; el primero oblicuo al segundo, pero perpendicular al tercer eje, que también es perpendicular al segundo.

⁷ J. Bernhardt, «Darstellung einer neue Methode, Kristalle zu beschreiben», *Gehlen's Journal J. Chem. Phys. Min.*, 5, Berlín (1808), 187.

⁸ Gustav Rose, *Elements de Cristallographie*, trad. francesa, París, 1834, 270 páginas, especialmente pp. 19 y 20.

6. El sexto sistema, caracterizado por tres ejes mutuamente inclinados de tipo distinto.

El descubrimiento de los sistemas cristalinos, fue probablemente el más importante de todos los de esta ciencia, pues permitió avanzar con orden dentro del problema general de la simetría cristalina. No puede extrañar, entonces, que el método de Weiss fuera adoptado, y los seis (o siete) sistemas cristalinos se vengán usando desde entonces. Lo único que ha cambiado ha sido los nombres que han ido surgiendo como resultado de gustos y modas, a los cuales los cristalógrafos no están nunca libres. Weiss había conseguido no sólo poner orden en los cristales, sino transformar la cristalografía en una ciencia exacta. Por ello vale la pena referirnos con mayor detalle a otras ideas de este gran hombre de ciencia.

LA LEY DE LAS INTERSECCIONES RACIONALES Y LOS PARÁMETROS DE UNA CARA

Una vez definidos los ejes del cristal, y conocida la inclinación de una cara, era una cuestión inmediata determinar las intersecciones de dicha cara con aquellos ejes. Ya Haüy había señalado que las dimensiones de las caras de una forma tenían relaciones constantes; por ejemplo, la razón entre las diagonales menor y mayor de un romboedro de calcita era constante. Weiss enfocó el problema desde un punto de vista más general. Así dijo que:

La relación entre el seno y el coseno de la inclinación (de una cara) con respecto al eje constituye el carácter geométrico principal de todas sus formas ⁹.

Weiss indicó también que esta relación era siempre el cociente de:

⁹ Weiss, *De indagando...*, trad. francesa, J. de Mines, 29 (1811), 349-391 y 401-444, especialmente p. 370.

o números enteros, o las raíces cuadradas de números enteros, o, si se quiere, de raíces cuadradas en general, porque un número entero puede considerarse siempre como raíz cuadrada de otro número entero ¹⁰.

De esta manera, Weiss se dio cuenta de que las intersecciones comparadas con las de la cara fundamental eran siempre números racionales y en general, pequeños. A este hecho experimental le dio el nombre de *ley de las intersecciones racionales*, que fue aceptada.

La ley de la racionalidad es una consecuencia directa de la hipótesis de Haüy según la cual el cristal está formado por la aposición ordenada de partículas pequeñas de forma geométrica dada por el poliedro de exfoliación. Haüy, como hemos visto, no la expresó como tal, a pesar de que podía deducirse de su teoría. Sólo en una nota de trabajo redactó algo parecido a su enunciado. La ley fue deducida por Bernhardt y Weiss sobre la base de las ideas de Haüy y especialmente a partir de las relaciones geométricas existentes entre caras y aristas del cristal.

La ley de la racionalidad de los índices es comparable en importancia para la ciencia de los cristales, a la ley de los volúmenes de Gay-Lussac para la química. Ambas expresan el comportamiento de la naturaleza según números enteros, es decir, expresan la discontinuidad de la materia y su constitución según unidades de volumen y dimensiones específicas.

Weiss señaló también que la relación entre los senos y cosenos de una forma primitiva dada se podía deducir cualquier ángulo entre los elementos (caras y aristas) de las formas primitivas y secundarias con respecto de un eje. Con el fin de operar de manera más directa, Weiss utilizó las normales a las caras de una forma, con lo que el cristal morfológico se transforma ahora en un haz de normales a sus caras. Esta concepción y la relación de senos y cosenos constituyen lo que hoy se conoce como cálculo cristalográfico, que gozó de un gran predicamento a lo largo del siglo XIX. A este desarrollo contribuyó la utilización que el propio Weiss hizo de la trigonometría esférica, dando el procedimiento en que se basaría el cálculo cristalográfico. A este método de trabajo contribuyeron numerosos cristalógrafos a lo largo del siglo XIX, y su mención

¹⁰ Weiss, *Ibid.*, p. 257.

haría desorbitada la relación de hechos que pretende esta obra. A pesar de todo vale la pena indicar que el primero que se refirió a la utilización de un sistema de ejes no ortogonales no fue Weiss, sino Friedrich Mohs (1773-1839), un mineralogista que nació en Genrode en el Harz. Mohs fue el director del Gabinete mineralógico de Null, del cual publicó en 1804 un catálogo con su sistemática. Mohs fue un cristalógrafo importante por aquellos años, pues a él se debe también el inicio de la cristalografía como ciencia exacta basada en la geometría. Su trabajo fundamental¹¹ introdujo cuatro sistemas cristalinos; el tesselar, el romboédrico, el piramidal y el prismático.

LA LEY DE ZONAS

La elección de un sistema de referencia único para el cristal y para sus formas y la introducción de los sistemas cristalinos no constituyeron en modo alguno, las únicas contribuciones de Weiss a la ciencia de los cristales. La elección de su sistema racional de ejes coordenados era, en realidad, una consecuencia previsible en la línea de pensamiento que ya había sido iniciada por Stensen. Weiss descubrió, además, uno de los hechos más llamativos de los cristales, al darse cuenta de que la mayoría de las caras de los cristales se disponían paralelas a ciertas direcciones del cristal, como se puede demostrar porque las aristas resultantes de sus intersecciones son paralelas. Este descubrimiento fue fundamental porque introdujo un orden en las series de crecimiento que la teoría de Haüy había predicho.

Weiss, que usó en sus medidas el goniómetro de reflexión de Wollaston, identificó conjuntos de caras en un cristal que, aunque no tuvieran intersecciones comunes, daban reflexiones cuando el cristal giraba alrededor de una dirección dada. Denominó zonas al conjunto de estas caras, y a la dirección común, eje de zona.

Weiss introdujo el concepto de zona en su traducción *Traité de Minéralogie* de Haüy. En efecto, en el tomo II, pág. 723 de 1804, en el

¹¹ Fr. Mohs, *Die Charaktere der Klassen, Ordnungen, Geschlechter und Arten, oder die Charakteristik der naturhistorischen Mineral-Systems*, Dresde (1820).

apartado «Sobre la cristalización de los Feldespatos», agrupó las caras conocidas de estos minerales en cuatro zonas, y mostró en el tomo III (1806) pág. 140, en el artículo sobre la epidota, que la posición de una cara venía definida por la intersección de dos zonas.

Expresó estas observaciones generales diciendo:

En el desarrollo progresivo de las diferentes caras de un cristal, cada cara viene determinada por las zonas que las caras precedentes forman.

La ley de zonas alcanzó gran predicamento en la nueva cristalografía geométrica, contribuyendo a su conocimiento numerosos cristalógrafos y matemáticos. El desarrollo de la teoría y su aplicación al cálculo de los cristales fue debido a Franz Ernst Neumann de Königsberg, y uno de los cristalógrafos alemanes más importantes del siglo pasado, cuyas obras¹² son clásicas a este respecto.

La ligazón existente entre la ley de zonas y la ley de la racionalidad de los índices, tal como finalmente se denominó a la ley de las intersecciones racionales, fue precisamente expuesta en la página 2 de su tesis *De lege zonarum*. Con ello quedaban definitivamente unidos dos conceptos, al parecer disparejos, en una unidad, la geometría propia del cristal.

El problema era simplemente que la geometría del cristal era una geometría nueva. No puede extrañar, por tanto, que un matemático entrara ahora en la liza. Se trata de August Ferdinand Möbius, que iba a ser célebre con sus estudios de topología. Möbius publicó su *Cálculo baricéntrico* en 1827, en el cual trató, en las páginas 266 y siguientes, el sistema de líneas y puntos en un plano, que coincide con las propiedades aritméticas y geométricas de las caras y aristas de los cristales. Fue precisamente Möbius el que halló ¹³ que se necesitaban tan sólo cuatro caras no pertenecientes a

¹² F. E. Neumann, *Beiträge zur Krystallonomie*, Berlín, 1823, en dos volúmenes; F. E. Neumann, *De lege zonarum principio evolutionis systematum crystallinorum*, Dissertationis inaug. Berolini, 1826.

¹³ A. F. Möbius, «Ueber das Gesetz der Symmetrie der Kristalle und die Anwendung diese Gesetzes auf die Eintheilung der Krystalle in Systeme», *Verh. Sächsl. Ges. d. Wiss. Math. Phys.*, CI (1848), 45.

una misma zona para poder calcular la posición de todas las demás caras de un cristal.

El cálculo cristalográfico, iniciado por Weiss con el uso de trigonometría esférica, quedó definitivamente establecido como parte importante de la ciencia, gracias a la estrecha colaboración de cristalógrafos y matemáticos.

El cristal se había convertido en una realidad geométrica, que los mineralogistas ya no podían olvidar, extendiéndose su interés hasta la propia Rusia, donde iba a surgir también una importante escuela de cristalografía ¹⁴.

LA NOTACIÓN PARAMÉTRICA

Convencido de que la nomenclatura de Häüy no sólo era muy complicada, sino que era equívoca en muchos casos, buscó Weiss un método que permitiera describir las caras de un cristal de manera clara y universal. Y nada mejor que utilizar las intersecciones de la cara sobre los ejes cristalinis. Weiss se dio cuenta de que la longitud de estas intersecciones, que se conocen como parámetros, no eran constantes, sino que dependían del tamaño del cristal. Lo que sí era constante, para una cara, era las relaciones de dichos parámetros. Weiss utilizó dicha relación como símbolo de la cara. Así, en el sistema regular, el cubo venía dado por la relación $(a: \infty a: \infty a)$, mientras que el dodecaedro venía representado por $(a: a: \infty a)$. Weiss tomó como forma principal la cara que corta a los ejes cristalinis a distancia unidad, y dio a cada una, según el sistema, un nombre, que se reúne en el cuadro I.

¹⁴ Por ejemplo, el mineralogista A. T. Kupffer publicaba ya en 1813, en Petersburgo, su *Handbuch der rechnerischen Krystallonomie*.

CUADRO I
FORMA PRINCIPAL Y NOTACIÓN EN LOS DISTINTOS SISTEMAS,
SEGÚN WEISS

<i>Sistema</i>	<i>Forma</i>	<i>Notación</i>
Regular	Octaedro	(a : a : a)
2.º sistema	Octaedro principal	(a : a : c)
3.º sistema	Hexagonododecaedro principal	(a : a : ∞ a : c)
4.º sistema	Romboctaedro	(a : b : c)
5.º sistema	Octaedro	(a : b : c)
6.º sistema	Octaedro	(a : b : c)

La forma general, cuyas intersecciones no son especiales, tenía la notación general (a : mb : nc) donde m y n eran dos números racionales, en general pequeños. Para el tercer sistema, su notación era (a : na : pa : mc) donde n, p, m eran otra vez números racionales y pequeños. Como puede verse en el Cuadro I, para poder poner índices consistentes en el sistema hexagonal (3.º sistema) Weiss ¹⁵ se vio forzado a introducir un tercer eje, el llamado eje i del sistema. Este método quedó consagrado por la práctica, y se utiliza corrientemente en cristalografía. (Ver, no obstante, la notación de Miller). Como la notación paramétrica fue también introducida con independencia por otro cristalógrafo berlinés, Gustav Rose (1798-1873), la notación se conoce como de Weiss-Rose. La notación paramétrica fue modificada en forma más útil algún tiempo más tarde por otro cristalógrafo alemán, Karl Friedrich Naumann (1797-1873) ¹⁶, profesor de Cristalografía de la Universidad de Freiberg, primero (1826-1841), y de Leipzig después.

¹⁵ Chr. S. Weiss, «Ueber eine verbesserte Methode für die Bezeichnung der verschiedenen Flächen eins Krystallsysteme», *Abhandl Berlin. Akad.* (1816-17), 321.

¹⁶ La notación paramétrica fue expuesta en sus dos obras fundamentales: *De hexagonali crytallinarum formarum systemate* y en *Grundriss der Krystallographie*, ambas publicadas en 1825 en Leipzig.

LA NOTACIÓN DE LÉVY

La complejidad de la notación de Häüy fue observada no sólo por los cristalógrafos alemanes, sino en la propia Francia. A medida que el entendimiento de la ciencia del cristal avanzaba, fue evidente que la versión original no era apropiada, y por lo tanto, era necesario modificarla, no sólo produciendo una notación más simple, sino también una notación que tuviera en cuenta la existencia de la simetría. Fue en este terreno que Armand Lévy (1774-1841) simplificó el método original de Häüy. Lévy era un matemático francés que hubo de emigrar a Inglaterra porque, durante la restauración francesa, a los judíos se les impidió entrar en la Universidad. Fue en Inglaterra donde Lévy se interesó en la Mineralogía. Falto de empleo fue encargado de redactar el catálogo de la colección mineralógica de Forster ¹⁷, colección que en aquel tiempo perteneció a Henry Heuland, un mercader adinerado. Durante la elaboración de este catálogo, se versó en la mineralogía de Häüy, y trató de simplificar la notación de aquél. En este catálogo de la colección, publicado en 1820, Lévy usó un nuevo método, pero no lo publicó hasta algún tiempo más tarde, en 1827, siendo, finalmente, perfeccionado por otro mineralogista francés, Alfred Louis Oliver Legrand Des Cloizeaux. (1817-1897) ¹⁸.

Lévy utilizó en su método de clasificación de los cristales los seis tipos o formas primitivas siguientes: el cubo, el romboedro o a veces el prisma hexagonal regular, el prisma recto de base cuadrada, el prisma romboidal recto, el prisma romboidal oblicuo y el prisma doblemente oblicuo.

Como en la notación de Häüy, Lévy usó tres letras, p, m, d, para denotar las tres caras del paralelepípedo fundamental, indicando por vocales los ángulos y las aristas por consonantes, y por exponentes decrecimiento correspondiente. La modificación fundamental, con respecto a la notación de Häüy, fue utilizar la misma letra en aristas o vértices equivalente por simetría en la forma primitiva.

¹⁷ Armand Lévy, *Description d'une collection de minéraux formée par M. Heuland*, Londres, 1837.

¹⁸ Ver A. Des Cloizeaux, *Leçons de Cristallographie*, Paris, 1861.

La notación de Lévy tuvo sus seguidores en Francia, donde la tradición de Haüy era muy importante. Hoy en día está totalmente abandonada, especialmente por haberse adoptado el método mucho más sencillo y racional que tratamos a continuación.

LOS ÍNDICES DE MILLER

La notación paramétrica estaba basada en considerar las caras como planos que circunscriben la forma primitiva. Para deducir la notación de una cara se puede también adoptar la filosofía contraria; tratar las caras como planos inscritos en la forma primitiva. En este caso se obtienen unos índices de una cara dados por recíprocos de sus parámetros. Este método fue desarrollado por la naciente escuela inglesa de cristalografía, específicamente por William Whewell (1794-1866) ¹⁹ y por William H. Miller ²⁰ (1801-1870) profesor de cristalografía de Cambridge. La elaboración de Miller y su impacto en cristalografía fue mucho más importante que la de Whewell, y sus índices se conocen como índices de Miller.

La idea de Miller, que él denominó ley, consiste en lo siguiente:

A partir de un punto O en el interior del cristal tracemos los planos de exfoliación. Sean OX, OY, OZ las tres intersecciones de estos planos, no todas en un plano; y consideremos que una cara corta a OX, OY, ZO en A, B, C. Si ahora otro plano cualquiera corta a OX, OY, OZ en H, K, L, y consideramos que HO, KO, LO sean positivos o negativos según se midan en las mismas direcciones de AO, BO, CO o en dirección opuesta, se encontrará que

$$\frac{1}{h} \frac{AO}{HO} = \frac{1}{k} \frac{BO}{KO} = \frac{1}{l} \frac{CO}{LO}$$

donde h, k, l son números enteros, positivos o negativos, uno o dos de ellos pueden ser cero ²¹. Las líneas OX, OY, OZ son los ejes del cristal, y las distancias AO, BO, CO los parámetros de la cara; h, k, l los índices de la

¹⁹ Whewell, «On a general method of calculating the angles of Crystals», *Phil. Trans.*, 1 (1825), 89.

²⁰ W. H. Miller, *A treatise on crystallography*, London (1839), VIII + 139 pp.

²¹ W. H. Miller, *Ibid.*, p. 1.

cara HKL. Esta cara se denotará por el símbolo (hkl), distinguiéndose un índice negativo por un signo menos colocado encima del mismo ²².

Los índices h, k, l son, según Miller, pequeños y no exceden en general de 6.

La terminología de Miller tenía, por tanto, una gran simplicidad, puesto que una cara quedaba inequívocamente determinada por un símbolo (hkl). Por otra parte Miller halló que

$$\frac{a}{h} \cos PX = \frac{b}{k} \cos PY = \frac{c}{l} \cos PZ$$

donde a, b, c, eran precisamente los parámetros AO, BO, CO, y PX, PY, PZ los arcos definidos sobre la esfera centrada en O por la intersección de la normal P a la cara (hkl) y las intersecciones X, Y, Z, de los ejes del cristal sobre dicha esfera.

La cristalografía de Miller se reducía, por tanto, a una cristalografía basada en trigonometría esférica, puesto que las caras del cristal se agrupan en zonas, definidas por el círculo máximo que dibujan sobre la esfera de referencia las intersecciones de las normales a las caras que están en zona. Este símbolo era [uvw], que podía deducir del de dos caras (hkl), (pqr) pertenecientes a la zona par

$$u = kr - lq, \quad v = lp - hr, \quad w = hq - kp.$$

También encontró que la condición de que una cara (hkl) pertenezca a una zona [uvw] viene dada por

$$uh + vk + wl = 0$$

Finalmente Miller definió «forma» como la figura resultante de una cara y sus simétricas, y les dio el símbolo {hkl}.

La importancia de Miller en el campo de la cristalografía fue grande y de larga duración. Vale la pena citar aquí que Miller tampoco siguió a Weiss en cuanto se refiere al sistema romboédrico,

²² W. H. Miller, *Ibid.*, p. 2.

pues le pareció oportuno seguir lo que el matemático francés Gabriel Lamé (1795-1870) ²³ había propuesto: utilizar tres ejes iguales, paralelos a las aristas del romboedro. Y así aparecieron los símbolos de tres índices en el romboédrico.

Por último, cabe indicar que Miller utilizó las proyecciones estereográfica y gnomónica para sus estudios.

Con la contribución de los cristalógrafos del primer tercio del siglo XIX la cristalografía morfológica quedaba reducida a la solución de una serie de problemas geométricos y así ha quedado hasta ahora.

LAS CLASES CRISTALINAS: HESSEL

La invención del goniómetro de aplicación por Carangeot y, especialmente, el de reflexión de Wollaston y su sucesiva mejora con la adición de un Nonius, hizo posible el estudio de los ángulos entre las caras de los cristales, y con ello la geometrización del cristal. Este estudio fue llevado a cabo por numerosos cristalógrafos, entre los que merece citar Malus, Wollaston, Brewster, Brooke, Phillips, Mohs, Breithaupt, Haidinger, Kupffer, Gustav y otros. La ciencia de los cristales, al poseer una técnica que permitía la obtención de datos cuantitativos, se transformaba rápidamente en una ciencia exacta. Esta ciencia sólo podía desarrollarse, con todo, si se explotaba un detalle de extraordinaria importancia: la simetría.

El establecimiento de los sistemas cristalinos por Weiss y Bernhardt constituyó el primer paso en este camino, puesto que los sistemas eran, en realidad, el reconocimiento de que en los cristales el sistema de referencia de los ejes coordenados debía ser variable y acomodados a las exigencias del cristal y de su simetría aparente.

En cuanto al desarrollo del concepto de simetría los cristalógrafos habían dado unos cuantos pasos de importancia. La ley de simetría de Haüy, que reconocía sólo la existencia de caras paralelas en un cristal, pronto fue sobrepasada por el hecho real de la

²³ G. Lamé. *Examen des différentes méthodes employées pour résoudre les problèmes de géométrie*, Paris, 1818.

existencia de cristales hemiédricos, que presentaban el desarrollo de sólo la mitad de las caras que requería la forma completa. Pero este reconocimiento de una realidad tenía un contexto metafísico, puesto que los cristales hemiédricos sólo eran la mitad de aquello que habría de ser. La ciencia debía emanciparse de este criterio metafísico si quería avanzar. Este camino fue emprendido por primera vez por Hessel.

Johann Friedrich Christian Hessel (1796-1872) nació el 27 de abril de 1796 en Nurenberg. Su padre era comerciante. Hessel estudió Medicina en Erlangen y Würzburg, donde, siguiendo sus inclinaciones naturales, amplió sus estudios en los campos de las matemáticas y ciencias naturales. Una vez alcanzado el título de Doctor en Medicina, se trasladó a la Universidad de Heidelberg, donde fue auxiliar de Bezold y de Leonhard, dedicándose al estudio de la orictognosia (mineralogía) y de los cristales, además de matemáticas, física y química, logrando el título de Doctor en Filosofía el 24 de enero de 1821. Cuatro años más tarde era nombrado Profesor de Mineralogía, después de haber sido Profesor extraordinario de la misma disciplina. Hessel fue una personalidad científica de gran versatilidad en sus intereses, pero a nosotros nos interesa desde el punto de vista de su contribución a la ciencia de los cristales.

La obra más importante de Hessel es el artículo que bajo el título *Krystall* ²⁴ fue publicado en 1830 en el diccionario físico de Gehler. En dicho artículo, que pasó desapercibido para los científicos, Hessel desarrolló el método de deducción de las posibles combinaciones de elementos de simetría en los cristales, deduciendo que eran 32. Estas combinaciones constituyen las llamadas clases cristalinas, cuya deducción se atribuyó a Bravais por su trabajo de 1849, hasta que L. Sohncke descubrió el trabajo original de Hessel en 1891 ²⁵

²⁴ Este artículo constituyó la obra *Krystallometrie, oder Krystallonomie und Krystallographie*, que se publicó en el vol. 88 de la *Ostwald's Klassiker der exacten Wissenschaften*, en dos volúmenes, y fue editado por E. Hess.

²⁵ L. Sohncke, *Die Entdeckung des Eintheilungsprincips der Krystalle durch J.F.C. Hessel*. Z. Kristallogr., 18 (1891), 486-498.

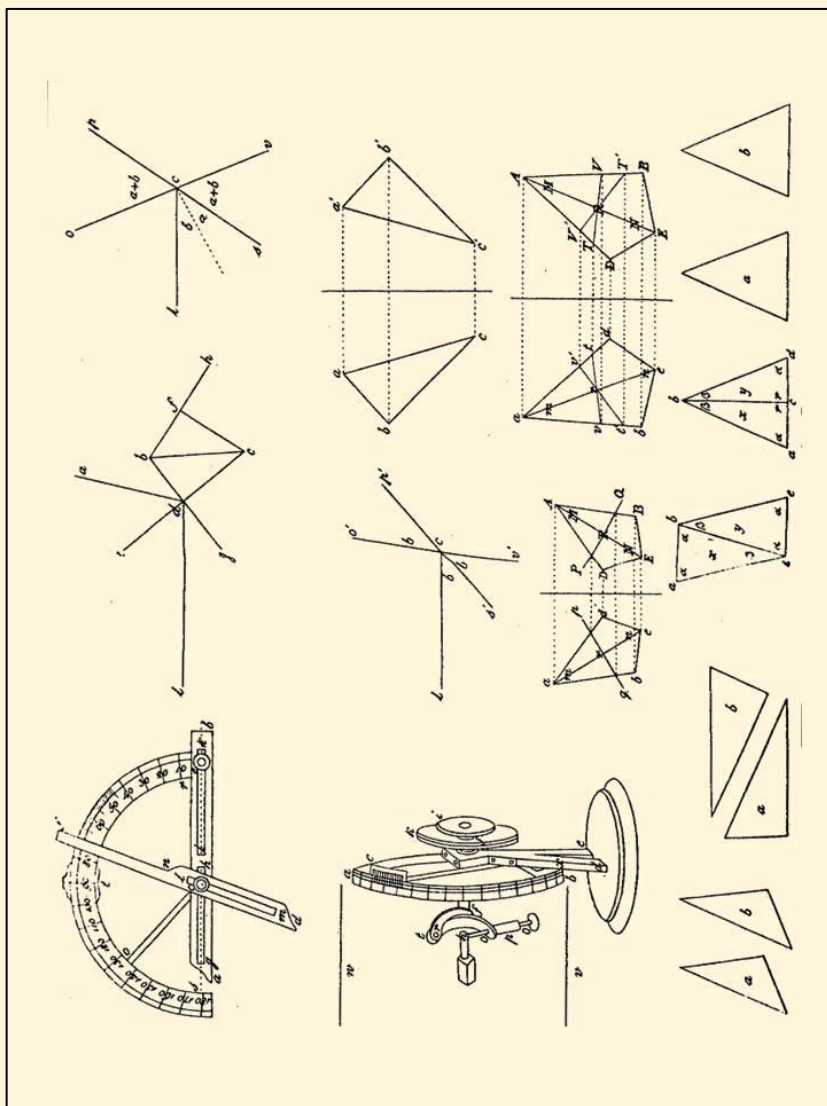


FIG 35.- *Las bases del estudio de Hessel, con los dos goniómetros.*

Lo que pretendía Hessel era, simplemente, analizar las formas de los cristales y clasificarlas. Para ello partió del análisis del contorno de figuras geométricas trazadas en un plano, y una vez deducidas las relaciones simétricas de dichas figuras, determinó los elementos de simetría que contenían. De esta manera identificó los operadores de simetría de primera especie (los ejes de simetría) y los de segunda especie (los planos). Una vez logrado esto, Hessel estudió las proyecciones de los cristales, y sobre ellas determinó los elementos de simetría que presentaban. Como resultado de esta elaboración Hessel encontró los tipos generales de simetría que correspondían a los cristales, es decir, halló la respuesta a la pregunta que él se había formulado al principio de su investigación, y que consistía en determinar de cuántas maneras y en qué orden se podían agrupar las partes que forman un cristal.

Hessel consideró que las partes iguales del cristal podían ser idénticas (que él señaló como \cong) o iguales pero opuestas, es decir, simétricas por plano (= en su nomenclatura). Uniendo estos criterios a la ley de racionalidad, Hessel determinó que el orden de los ejes de simetría no podía ser más que 1, 2, 3, 4 y 6. También dedujo que cada uno de estos ejes podían tener siete condiciones características, con lo que existían 35 grupos distintos, que, a su vez, podían agruparse en 8 casos generales. Así, existía el eje de orden 1, es decir, sin eje de simetría; el eje era impropio y equivalente a un plano de simetría; el eje era perpendicular a un plano de simetría; que un plano era perpendicular a ejes; y así sucesivamente. Aplicando estos criterios a los ejes encontró que había 27 posibilidades, que unidas a los casos anteriores y eliminando situaciones idénticas, redujo el número de posibilidades a 32.

El resultado lo reunió en un cuadro, que por su interés histórico se da a continuación, con la nomenclatura moderna al lado de la propuesta por Hessel.

Como puede verse, Hessel halló 36 posibilidades, pero en una nota unida al cuadro el propio autor indicaba que el caso D.2 era idéntico al D.6; que el D.5 era idéntico al D.8; que el D.9 era al D.4, y que el D.10 era igual al D.11. De esta manera las 36 posibilidades se reducían, en efecto, a 32. A estas posibilidades se las conoce como clases cristalinas.

LAS 32 CLASES CRISTALINAS DE HESSEL

NOMENCLATURA DE HESSEL	NOMENCLATURA MODERNA
A	
<i>Dreigliedrig vieraxige Systeme</i>	<i>Sistema cúbico</i>
1. Zweifach dreigliedrig achtstrahliges System.	Holoedría.
2. Einfach dreigliedrig achtstrahliges System.	Hemiedría enantiomórfica.
3. Zweifach dreigliedrig vierstrahliges System.	Hemiedría hemimórfica.
4. Einfach dreigliedrig vierstrahliges System.	Tetartoedría.
5. Einfach dreigliedrig zweimal vierstrahliges System.	Hemiedría paramórfica.
B	
<i>Ein-und dreimassige Systeme</i>	<i>Sistema hexagonal</i>
1. Gleichstellig gleichendig zweifach sechsgliedriges System.	Holoedría.
2. Gleichstellig gleichendig einfach sechsgliedriges System.	Tetartoedría trigonal.
3. Ebenbildlich gleichendig einfach sechsgliedriges System.	Hemiedría enantiomórfica.
4. Ungleichendig zweif. Sechsgliedriges System.	Hemiedría hemimórfica
5. Ungleichendig einf. sechsgliedriges System.	Hemiedría trapezoédrica trigonal.
6. Gerenstellig gleichendig zweifach dreigliedriges System.	Hemiedría paramórfica trigonal.
7. Gerenstellung gleichendig einfach dreigliedriges System.	Tetartoedría trigonal.
8. Ebenbildlich gleichendig einfach dreigliedriges System.	Hemiedría enantiomorfa trigonal.
9. Gleichstellig gleichendig zweifach dreigliedriges System.	Holoedría trigonal.
10. Gleichstellig gleichendig einfach dreigliedriges System.	Tetartoedría.
11. Ungleichendig zweifach dreigliedriges System.	Hemiedría alternante.
12. Ungleichendig einfach dreigliedriges System.	Tetartoedría alternante.

C

Ein- und zweimassige Systeme

1. Gleichstellig gleichendig zweifach viergliedriges System.
2. Gleichstellig gleichendig einfach viergliedriges System.
3. Ebenbildlich gleichendig einfach viergliedriges System.
4. Ungleichendig zweifach viergliedriges System.
5. Ungleichendig einf. Viergliedriges System.
6. Gerenstellig gleichendig zweifach zweigliedriges System.
7. Gerenstellig gleichendig einfach zweigliedriges System.

Sistema tetragonal

- Holoedría.
- Hemiedría hemimórfica.
- Hemiedría enantiomórfica.
- Hemiedría paramórfica.
- Tetartoedría.
- Hemiedría con eje de reflexión.
- Tetartoedría con eje de inversión.

D

Ein- und einmassige Systeme

1. Gleichstellig gleichendig zweifach zweigliedriges System.
2. Gleichstellig gleichendig einfach zweigliedriges System.
3. Ebenbildlich gleichendig einfach zweigliedriges System.
4. Ungleichendig zweifach zweigliedriges System.
5. Ungleichendig einfach zweigliedriges System.
6. Gerenstellig gleichendig zweifach eingliedriges System (= 2).
7. Gerenstellig gleichendig einfach eingliedriges System.
8. Ebenbildlich gleichendig einfach eingliedriges System (= 5).
9. Gleichstellig gleichendig zweifach eingliedriges System (= 4).
10. Gleichstellig gleichendig einfach eingliedriges System.
11. Ungleichendig zweifach eingliedriges System (= 10).
12. Ungleichendig einfach eingliedrige

Sist. digonal (Rómbico, monocl. y triclí)

- Holoedría rómbica.
- Holoedría monoclinica.
- Hemiedría enantiomórfica rómbica.
- Hemiedría hemimórfica rómbica.
- Hemiedría hemimórfica monoclinica.
- Holoedría monoclinica.
- Holoedría triclínica.
- Hemiedría hemimórfica monoclinica.
- Hemiedría hemimórfica rómbica.
- Hemiedría enantiomórfica monoclinica.
- Hemiedría enantiomórfica monoclinica.
- Hemiedría triclínica.

LA LABOR DE BRAVAIS

En 1849 Bravais ²⁶ acometió con independencia de Hessel el estudio de las relaciones de simetría presentes en los poliedros, utilizando para ello un método muy elegante, basado en la distribución simétrica de los vértices de un poliedro. Con ello el poliedro quedaba reducido a una agregación de un cierto número de puntos distribuidos de cierta manera alrededor de su centro de gravedad. De esta manera un eje de simetría quedaba definido como aquella recta que al hacer girar el poliedro alrededor de la misma un ángulo dado, las posiciones nuevas S' de los vértices coinciden con las antiguas S . Los puntos S y S' son homólogos unos de otros. Un plano de simetría se definía de manera análoga como el resultado de la reflexión de los vértices sobre dicho plano, y también los puntos coincidentes por esta operación eran homólogos. En una serie de teoremas, Bravais dedujo las relaciones existentes entre los elementos de simetría, relaciones que han sido incorporadas a todos los libros de cristalografía.

Bravais clasificó en su trabajo los poliedros en cuatro grandes grupos:

1. Poliedro asimétrico.
2. Poliedros simétricos sin ejes de simetría.
3. Poliedros simétricos con eje principal.
4. Poliedros simétricos esferoidales.

En el tercer grupo distinguió Bravais los poliedros con eje principal par de los que lo poseían impar, y entre los poliedros esferoidales separó los poliedros cuaternarios de los decenternarios, según el número de ejes ternarios que le son propios. Para todos estos grupos Bravais dedujo los elementos de simetría que podían presentarse unidos. Los resultados se dan en el cuadro adjunto. En el cuadro se ha respetado, por razones históricas, el aspecto que le dio

²⁶ Bravais, *Mémoire sur les polyèdres de forme symétrique*, J. Math. Pures et Appliqués (Louvillie), 14 (1849), 141-180.

CLASIFICACIÓN DE POLIEDROS, SEGÚN LA NATURALEZA DE SU
SIMETRÍA, POR A. BRAVAIS

Poliedro	Símbolo de la simetría del poliedro	Clase del poliedro
ASIMÉTRICO	oL, oC, oP	1°
SIMÉTRICOS	desprovisto	oL, C, oP
	de ejes	oL, oC, P
	de orden par	A ^{2q} , oL ² , oC, oP
		A ^{2q} , oL ³ , C, π
		A ^{2q} , qL ² , qL' ² , oC, oP
		A ^{2q} , oL ² , oC, qP, qP'
		A ^{2q} , qL ² , qL' ² , C, π , qP ² , qP' ²
		A ^{2q} , 2qL ² , oC, 2qP
	de orden impar	A ^{2q+1} , oL ² , oC, oP
		A ^{2q+1} , oL ² , C, oP
		A ^{2q+1} , oL ² , oC, π
		A ^{2q+1} , (2q+1)L ² , oC, oP
		A ^{2q+1} , oL, oC (2q+1)P
		A ^{2q+1} , (2q+1)L ² , C, (2q+1)P ²
		A ^{2q+1} , (2q+1)L ² , OC, π , (2q+1)P
	cuaternario	4L ³ , 3L ³ , oC, oP
		4L ³ , 3L ³ , C, 3P ²
		4L ³ , 3L ³ , oC, 6P
		3L ³ , 4L ³ , 6L ² , oC, oP
		3L ⁴ , 4L ³ , 6L ² , C, 3P ⁴ , 6P ²
	Decenternarios	6L ⁵ , 10L ³ , 15L ² , oC, oP
		6L ⁵ , 10L ³ , 15L ² , C, 15P ²

Bravais. Según él, había, por tanto, 21 clases; pero como el mismo autor señalaba ²⁷:

Pueden observarse que las clases 4a, 5a, hasta la 16a inclusive, se dividen a su vez en diferentes órdenes, según sea el orden de la simetría del eje principal.

De esta manera, las clases 4^a a 9^a generan clases distintas según que el eje principal sea 3, 4 ó 6. En cuanto a las clases 10^a a 16^a, inclusive, sólo puede haberlas con eje de orden 3. Introduciendo estos elementos de simetría en la tabla resultan 33 clases, que se reducen a 32 si se tiene en cuenta que la clase 12 es idéntica a la 16. En nomenclatura moderna la clase 12 es $3/m$., mientras que la 16 corresponde a $\bar{6}$, y ambas simetrías son idénticas. Bravais, con todo, no indicó la equivalencia de dichas clases ni reconoció los ejes de inversión. Para ello haría falta la contribución de Pierre Curie, que se analizará en el capítulo 15.

²⁷ Bravais, *Ibid.*, pp. 179-180.

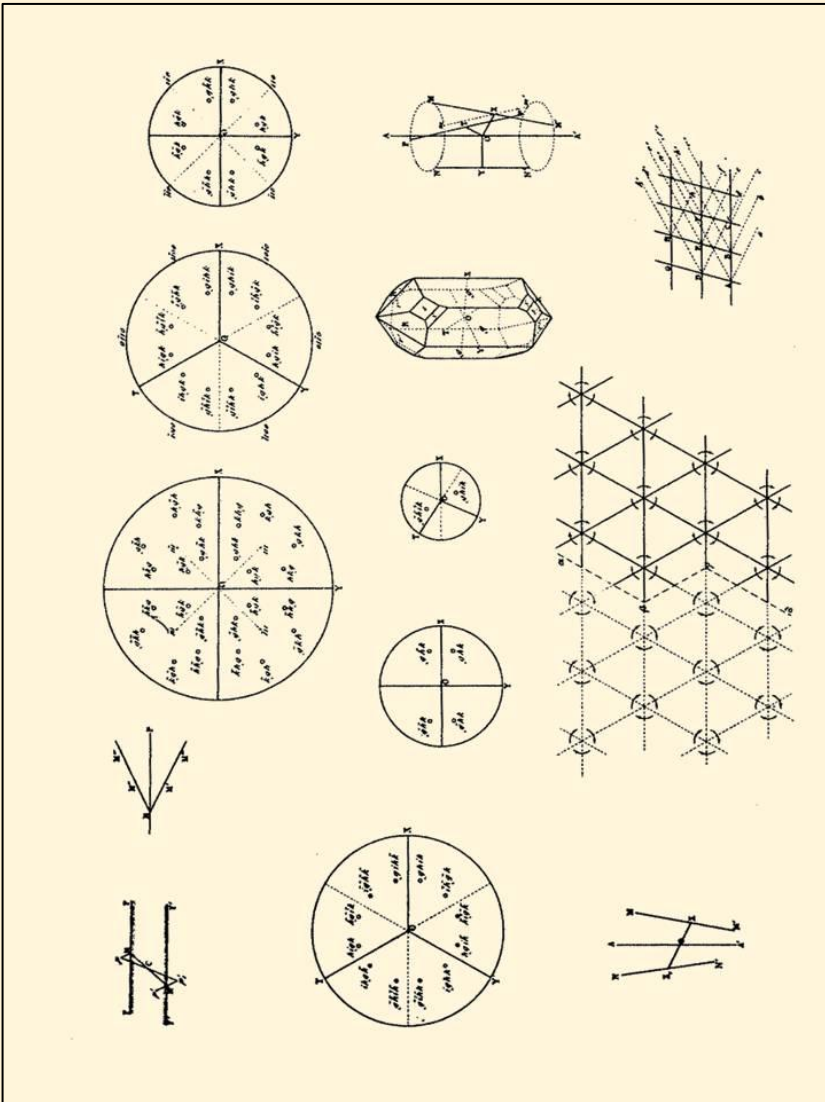


FIG. 36.- Ilustración de los poliedros cristalográficos de Bravais.

10. ENTENDIENDO LA ÓPTICA DE LOS CRISTALES

TODO EMPEZÓ CON EL ESPATO DE ISLANDIA Y UNA SUPERFICIE REFLECTORA

La historia de este capítulo empieza con un veterano de la desgraciada aventura militar de Napoleón en Egipto. A salvo de las balas del campo de batalla y milagrosamente curado de la plaga bubónica, Etienne Louis Malus (1775-1812) había regresado a París, ciudad donde había nacido hacía veintiséis años. Era uno de los oficiales franceses que a bordo del *Castor*, un barco de transporte inglés, fue devuelto a Francia cuando la campaña fue liquidada. De regreso en Francia, Malus continuó su carrera militar como ingeniero, primero en Lille, después en Amberes y Estrasburgo y finalmente, en 1810, en París. En medio de sus obligaciones militares, Malus tuvo tiempo de dedicar parte de sus energías al estudio de la óptica. Ya durante la campaña de Egipto, en 1798, había preparado una memoria sobre la luz, y en 1807 presentó a la Academia de Ciencias de París un tratado sobre óptica analítica y una memoria sobre el poder de refracción de los cuerpos opacos. La importancia de la obra de Malus no derivó de estos trabajos, sino del

descubrimiento de la polarización de la luz. El descubrimiento fue narrado por Arago ¹ en los términos siguientes:

Un día, en su casa de la calle d'Enfer, Malus examinó a través de un cristal birrefringente el rayo de sol reflejado en los vidrios de las ventanas del palacio de Luxemburgo. En vez de las dos imágenes brillantes que esperaba ver, observó sólo una, el ordinario o el extraordinario, según la posición que el cristal ocupaba frente a sus ojos. Este fenómeno singular le llamó mucho la atención: trató de explicarlo suponiendo algunas modificaciones particulares de la luz del sol que pudiera haber surgido al atravesar la atmósfera. Pero llegada que hubo la noche, hizo reflejar la luz de una lámpara sobre una superficie de agua, a un ángulo de 36° y vio, comprobándolo con el cristal birrefringente, que la luz reflejada por el agua también estaba polarizada de la misma manera como si surgiera de un cristal de espato calizo. El mismo experimento hecho con un vidrio reflector a incidencia cerca de 35° dio el mismo resultado.

Malus repitió el experimento con la luz que venía directamente de la vela, y vio las dos imágenes esperadas. Algo diferente ocurría con la luz reflejada. Malus había descubierto un hecho experimental que indicaba que la luz que era reflejada por cualquier tipo de cuerpos, ya fueran transparentes u opacos, tenía propiedades fundamentalmente diferentes de la luz originada por una fuente luminosa. Malus, que era un seguidor de la teoría corpuscular de Newton, puesto que no tenía ninguna razón para dudar de la autoridad del gran maestro, interpretó el fenómeno como el efecto de alguna polaridad existente en el cristal. Este efecto consistía para Malus en lo siguiente:

Cuando las moléculas de la luz atraviesan los cuerpos cristalinos birrefringentes, sufren sobre sus centros de gravedad diversos movimientos que dependen de la naturaleza de las fuerzas que las partículas del cristal ejercen sobre ellas. A veces el efecto de esta fuerza se reduce a alinear todas las moléculas del mismo rayo de forma paralela, de tal manera que sus caras homólogas están orientadas en la misma dirección del espacio. Malus ha designado a este fenómeno polarización comparando el efecto de las fuerzas

¹ François Arago, *Biographies of distinguished scientific men*. Traduc. Inglesa por W. H. Smyth, Rev. Baden Powell y Robert Grant. Longman, Brown Green, Longmans y Roberts, London, 1857, VIII + 607, especialmente p. 387.

a las de un imán que gira los polos de una serie de agujas magnéticas en la misma dirección ².

Repitiendo el experimento que Huygens y Newton habían realizado con dos cristales superpuestos de espato de Islandia, observó que en ciertas circunstancias se producían dos imágenes, pero que sus intensidades cambiaban con la rotación del cristal, observando además que mientras una de las imágenes aumentaba su intensidad, la otra, por el contrario, disminuía. Consideró *polos* las direcciones del cristal según las cuales la intensidad era la misma para cada rayo, y de acuerdo con ello bautizó su descubrimiento como polarización de la luz. A finales de 1808 comunicó su descubrimiento ³ a la Société Philomatique de París, sin esperar a la concesión del premio que la Academia de Ciencias de París había convocado el 4 de enero de 1808 sobre la proposición siguiente: “Dar una teoría matemática, confirmada por experimento, de la doble refracción que la luz sufre al pasar a través de diferentes cuerpos cristalizados.” Su memoria sobre la propiedad de la luz reflejada por cuerpos transparentes fue revisada por Lagrange, Häüy, Gay-Lussac y Biot, y Malus recibió el premio. La memoria fue comunicada a la Academia de Ciencias de París por el mismo Laplace, quien en vista de lo convincente que era para él la interpretación corpuscular de la polarización, desearía que Huygens, el defensor de la teoría ondulatoria de la luz, se hubiera reducido a dar sus observaciones de la doble refracción “como resultados sólo de las experiencias” en vez de proponer una teoría falsa. Este momento parecía el día de la victoria para la causa de la teoría corpuscular.

En un famoso experimento que desconcertó a muchos de sus contemporáneos, Malus demostró que se podía hacer desaparecer un rayo de luz utilizando no ya un cristal de espato de Islandia, sino dos

² Biot, *Recherches expérimentales et mathématique sur les mouvements des molécules de la lumière autour de leur centre de gravité*, París, Firmin Didot, 1814, LXXVIII + 523 pp., especialmente p. 1.

³ Malus, «Sur une propriété de la lumière réfléchi par les corps diaphanes», *Nouveau Bulletin des Sciences*, Société Philomatique de París (1807-1809), 266-269. Malus, «Sur les phénomènes qui dépendent des formes de molécules de la lumière», *Ibid.*, 341-344; 353, 355.

espejos cruzados. La polarización de la luz de esta manera se convirtió en un fenómeno general. Más tarde, Malus definiría el plano de polarización como el plano de refracción, es decir, el plano que contiene el rayo incidente perpendicular a la superficie reflejante.

El descubrimiento de Malus fue merecidamente aclamado no sólo en su tierra natal, sino al otro lado del Canal de la Mancha, y por un hombre que mantenía otras ideas acerca de la naturaleza de la luz. Thomas Young (1773-1829), que había descubierto la interferencia de la luz, escribió el 22 de marzo de 1811 a Malus informándole de que el Consejo de la Royal Society le había concedido la medalla Rumford como reconocimiento por su valiosa contribución al conocimiento de la óptica. La salud de Malus, sin embargo, se había deteriorado rápidamente a mediados de año, falleciendo, poco después, el 2 de febrero de 1812 como consecuencia de una tuberculosis probablemente adquirida en Egipto. La medalla, atrapada en medio de la guerra entre Inglaterra y Francia, nunca llegó a poder de la persona a la cual había sido concedida. La muerte de Malus privó a la ciencia de uno de sus científicos más inquisitivos, y al mismo tiempo constituyó un ejemplo de tragedia propia de la era romántica en la cual ocurrió. La escena vale la pena reproducirla aquí como ejemplo de amor verdadero:

Cuando regresó de Egipto estaba Persuadido de que su enfermedad era contagiosa especialmente cuando la padecen personas atacadas por la plaga; sin embargo, permitió que su esposa descansara su cabeza sobre la suya, confortándole en sus últimos momentos de tal manera que ella se hallaba constantemente rodeada por la atmósfera que él respiraba. Hasta el último momento, esta mujer admirable, no podía creer en la desgracia que le amenazaba, y cuando el ilustre sabio exhaló su último suspiro se necesitó casi de la violencia para separarla del cuerpo inanimado de su marido. Ella (Wilhelmine Louise Koch), falleció pocos meses después consumida por la misma enfermedad que había terminado con su marido ⁴.

⁴ Arago, *Biographies...*, p. 395.

POLARIZACIÓN ROTATORIA

Como hemos indicado en otro capítulo de este libro, Huygens y Newton habían observado ya el fenómeno que Malus interpretó de manera tan brillante. En efecto, aquellos autores habían observado que no siempre se veía la división del rayo incidente en dos y que cuando esta división se presentaba ambas imágenes tenían intensidades diferentes. Sus observaciones ya indicaban que la naturaleza de la luz al atravesar el cristal tenía cualidades distintas de las de la luz incidente. La muerte prematura de Malus, cuando sólo tenía treinta y siete años de edad, truncó una vida científica prometedora a su inicio. Nuevos científicos, sin embargo, recogieron en sus manos el fruto del descubrimiento de Malus, especialmente el francés François Arago (1786-1853).

Ya en 1811 Arago ⁵ había reconocido que un rayo de luz polarizado propagándose a través de una placa de cuarzo cortada perpendicularmente a sus ejes producía, cuando se analizaba por otro espato de Islandia, dos imágenes y que sus imágenes tenían colores complementarios. En el caso de que el espesor del espato fuera insuficiente para separar enteramente las dos imágenes, la región central era blanca. Este era un hecho experimental completamente nuevo, pues los otros cristales mostraban el centro de la figura en negro. Arago interpretó el fenómeno como producido por polarización del rayo en el cuarzo según dos planos distintos; también descubrió la polarización de la luz coloreada, inventando un nuevo método para descomponer la luz. El experimento llamó la atención, pero Arago se hallaba demasiado ocupado en otros campos del saber y abandonó esta prometedora línea de investigación.

El extraño fenómeno del cuarzo fue pronto interpretado de manera correcta por Jean Baptist Biot ⁶ (1884-1826). Este físico

⁵ Arago, «Sur une modification remarquable qu'éprouvent les rayons lumineux dans leur passage à travers certains corps diaphanes, et sur quelques autres nouveaux phénomènes d'optique», *Mem. Inst.*, 1811 (publicado en 1812). 93-134.

⁶ Biot, «Sur des nouveaux rapports qui existent entre la réflexion et la polarisation de la lumière par les corps cristallisés», *Mem. Inst.*, 1811 (1812), 135-280.

Biot, «Mémoire sur un nouveau genre d'oscillations que les molécules de la lumière éprouvent en traversant certains cristaux», *Mem. Inst.*, 1812 (1814), 1-371.

estudió el rayo polarizado obtenido con cada uno de los colores producidos por el espato, encontrando que el plano de polarización se desviaba un ángulo proporcional al espesor de la placa y que este ángulo era función del color de la luz y del índice de refracción. Observó además que unos cristales de cuarzo desviaban la luz a la derecha, mientras que otros lo hacían a la izquierda. El fenómeno de la polarización rotatoria había sido descubierto, un fenómeno que iba a tener importantes consecuencias en el estudio de los cristales especialmente gracias a los trabajos de Pasteur en la segunda mitad del siglo.

Biot interpretó la razón del diferente comportamiento del cuarzo frente a otros cristales biáxicos, suponiendo que existía una oposición en las fuerzas que actúan sobre los rayos extraordinarios. En el caso del cuarzo, supuso que el rayo extraordinario era atraído por los ejes del cristal, mientras que lo opuesto ocurría con los otros cristales. Así dedujo que el fenómeno podía ser explicado por un elipsoide oblató, tal como Huygens había sugerido para la calcita. Biot, que era partidario de la teoría corpuscular de la luz, clasificó los cristales en dos grandes clases: cristales atractivos y cristales repulsivos.

EL SISTEMA DE LOS ANILLOS COLOREADOS: CRISTALES POSITIVOS Y NEGATIVOS

Mientras tanto, al otro lado del Canal, un físico escocés, David Brewster (1781-1868), se sumaba a la discusión del problema. Este científico no sólo expresó de manera precisa la ley del ángulo de polarización que había sugerido Malus, sino que en 1813 descubrió:

El sistema de anillos coloreados producidos por un eje de doble refracción y el aún más bello y complicado sistema producido por dos ejes.

Biot, «Observations sur la nature des forées qui partagent les rayons lumineux dans les cristaux doués de la double réfraction», *Mem. Inst.*, 1813, 1814 y 1815 (1818), 221-234.

El sistema era lo que hoy en día llamamos figuras de interferencia de la luz por cristales. La figura observada muestra dos tipos muy distintos: en un caso la figura consiste en una serie de círculos concéntricos, cruzados por una cruz negra. En el segundo caso, la figura consiste en una serie de elipses distorsionadas con dos centros muy claros. La cruz negra se transforma en dos hipérbolas cuando la preparación gira, bien tras que en el primer caso permanece fija durante el tiempo de la rotación. Brewster pensó que la cruz era debida a la existencia de uno o de dos ejes de polarización en el cristal. En el caso de cristales no birrefringentes supuso que existían tres ejes de polarización.

Los anillos coloreados que Brewster había observado fueron reconocidos también por muchos otros: en 1814, por ejemplo, Wollaston los observó en el espato de Islandia, cosa que fue confirmada al año siguiente por Biot en Francia y A. Seebeck (1804 - 1849) en Alemania. Estas figuras de interferencia se incorporaron inmediatamente como una técnica al trabajo útil para el estudio de los cristales. Quizás la mayor contribución de este campo provino del mismo Brewster.

Brewster estaba interesado en relacionar el carácter de las propiedades ópticas del cristal con su morfología, especialmente con la forma primitiva que Haüy había definido. El escocés estudió 155 especies cristalinas, observando el correspondiente sistema de «anillos coloreados» en cada uno de ellos. Si comparamos el número de especies cristalinas estudiadas por Brewster, con sólo las 20 que Haüy había observado, y las 19 (las mismas que Haüy, excepto el topacio) que Malus había vuelto a estudiar, podemos comprender el gran valor de las observaciones de Brewster. Con este material dicho autor pudo generalizar y establecer las bases de un conocimiento científico:

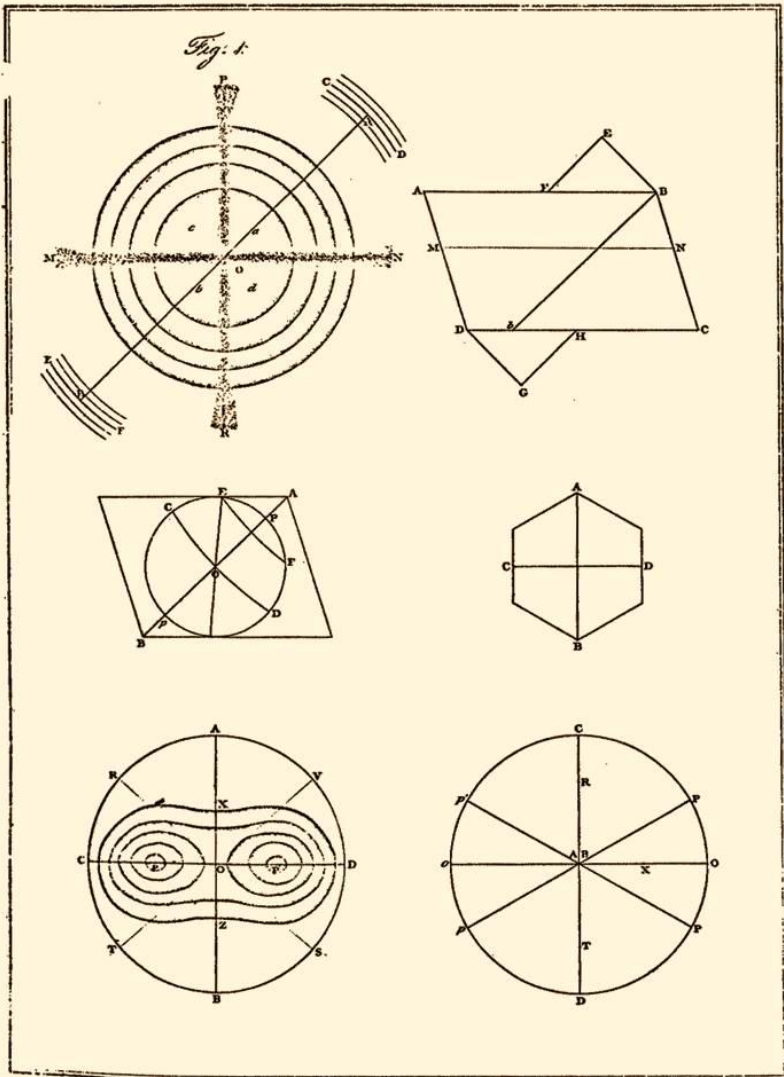


FIG. 37.- Las figuras de interferencia, según Brewster.

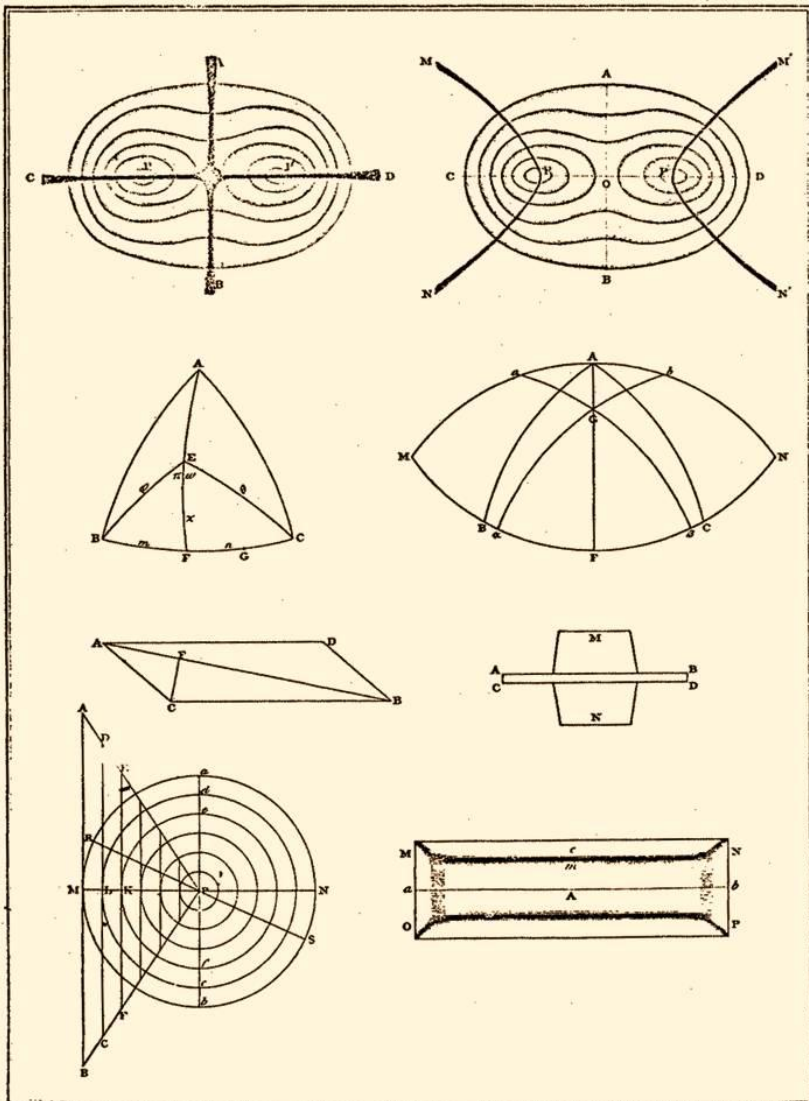


FIG. 38.- Las figuras de interferencia, según Brewster.

Se ve..., que todos los cristales con uno, dos o tres ejes se agrupan con sus formas primitivas y que son sólo excepciones de este hecho general la idocrasa y la apofilita para los que se hallará sin duda alguna una forma primitiva diferente de la que les asignó Haüy. Todos los cristales con tres ejes tienen como forma primitiva el cubo, el octaedro regular, o el dodecaedro romboidal; y todos los cristales que tienen dos ejes cristalizan en las otras formas dadas en el cuadro ⁷.

Como el cuadro tiene interés histórico se reproduce a continuación. Gracias a estos datos Brewster pudo anunciar el primer principio de la óptica cristalina:

Existe una conexión inequívoca entre la forma primitiva de un cristal y el número de sus ejes extraordinarios de refracción ⁸.

En el lenguaje moderno este principio diría:

El carácter de las propiedades ópticas de un cristal depende de su simetría.

FIG. 39 modificada.-*Tabla de Brewster. Las propiedades ópticas de los cristales clasificadas según su simetría.*

-
- BOURNON makes it a quadrangular rectangular prism with a square base.
 - † BOURNON makes it a quadrangular prism with a rhomboidal base.
-
- The table of primitive forms which I have used, is the one drawn down by DR. THOMSON in the Article *Crystallography*, in the Edinburgh Encyclopedia, as it contains many of the observations made by HAUY and BOURNON, since the publication of HAUY's *Traité de Minéralogie*.

⁷ David Brewster, *On the laws of polarization and double refraction in regularly crystallized bodies* Phil. Trans. London, 108 (1818), 199-272, especialmente página 225.

⁸ Brewster, *op. cit.*, p. 223.

Entendiendo la óptica de los cristales

TREE AXES	<ul style="list-style-type: none"> Muriate of soda Boracite Leucite Analcime Aplome Posphate of manganese&iron 	Cube	TWO AXES	<ul style="list-style-type: none"> Muriate of barytes Sulfate of magnesia Prusiate of potash Mesotype Sulfate of nickel and zinc 	Right quadrangular prism with a square base
TWO AXES	<ul style="list-style-type: none"> Anhidrite Cymophane Prehnite Peridot Stilbite Tartrate of potash 	Right quadrangular prism with rectangular base	TWO AXES	<ul style="list-style-type: none"> Sulphate of iron 	Rhomboid with an acute summit
			ONE AXE	<ul style="list-style-type: none"> Arseniate of copper Apatite Beryl Emerald Nepheline Sapphire Ruby 	Regular Hexahedral prism
TWO AXES	<ul style="list-style-type: none"> Sulfate of strontium Sulphate of barytes Mica Talc Spodumene Sulphate of soda Carbonate of potash Tartrate of potash and soda Citric acid 	Right Quadrangular prism; base a rhomb	TREE AXES	<ul style="list-style-type: none"> Garnet Blende 	Rhomboidal dodecahedron
			ONE & TWO AXES	<ul style="list-style-type: none"> Sulphate of potash 	Bipiramidal dodecahedron
TWO AXES	<ul style="list-style-type: none"> Sulphate of lime Epidote Axinite 	Right quadrangular prism base an oblique parallelogram	TREE AXES	<ul style="list-style-type: none"> Fluor spar Muriate of ammonia Alum Spinnelle ruby Pleonaste Diamond Ruby copper Nitrate of lead 	Regular octohedron
TWO AXES	<ul style="list-style-type: none"> Borax 	Oblique quadrangular prism with a rectangular base	TWO AXES	<ul style="list-style-type: none"> Nitrate of potash Sulphate of soda Arragonite Topaz Carbonate of lead Sulphate of lead 	Octohedron in which the pyramids have a rectangular base
TWO AXES	<ul style="list-style-type: none"> Oxalic acid Sugar Sulphur Acetate of copper Tartaric acid Chromate of lead 	Oblique quadrangular prism; base a rhomb	ONE AXE	<ul style="list-style-type: none"> Zircon Mellite Idocrase Apophyllite Arseniate of potash 	Octohedron in which the pyramids have a square base
TWO AXES	<ul style="list-style-type: none"> Feldspar Kyanite Sulphate of copper 	Oblique quadrangular prism; base a oblique parallelogram	TWO AXES	<ul style="list-style-type: none"> Carbonate of soda 	Octohedron in which the pyramids have a rhomb for their base
ONE AXE	<ul style="list-style-type: none"> Calcareous spar Bitter spar Quartz Tourmaline 	Rhomboid with an obtuse summit			

Las observaciones de Brewster demostraron que los cristales cúbicos eran isotropos, que los cristales hexagonales, romboédricos y tetragonales eran uniáxicos, y que los demás eran biáxicos.

Habiendo encontrado la dependencia estricta de las propiedades ópticas con la morfología del cristal, Brewster pudo predecir las propiedades ópticas de 15 sustancias descritas por Haüy y Bournon, cuyas propiedades ópticas eran desconocidas.

Además estaba tan convencido de las ventajas que el método óptico ofrecía frente al difícil estudio de la morfología del cristal, que no dudó en declarar:

Es mucho más difícil detectar la forma de un cristal que examinar, por observación directa, sus propiedades ópticas ⁹,

sugiriendo a los cristalógrafos el uso de las propiedades ópticas de los cristales para sus estudios.

Pero Brewster no se satisfizo sólo con hallar las relaciones existentes entre el carácter óptico y la morfología del cristal; quiso explicarlas en función de la estructura atómica de los cristales. Para ello utilizó el modelo original de Huygens, suponiendo que los cristales estaban formados por cuerpos esféricos o esferoidales de densidad variable, con los cuales se podían simular las propiedades ópticas de los cristales. Concluyó diciendo que:

En los cristales, la estructura polarizante... depende de la forma de sus moléculas integrantes y de la variación de sus densidades ¹⁰.

Brewster no estaba de acuerdo con la nomenclatura propuesta por Biot, puesto que los cristales atractivos o repulsivos se pueden explicar también de manera inversa, con tal de invertir la naturaleza de la atracción o repulsión. Para evitar este defecto introdujo el concepto de cristal positivo y negativo, terminología que ha persistido hasta hoy:

⁹ Brewster, *op. cit.*, p . 206.

¹⁰ Brewster, *op. cit.*, p . 219.

Para señalar esta diferencia de acción he empleado los términos positivo y negativo que denotan simplemente la oposición de las fuerzas polarizantes y no su naturaleza ¹¹.

El descubrimiento de cristales con dos ejes le llevó a decir:

Estas observaciones parece que prueban no sólo que la ley de Huygens queda sin demostrar como una ley general de la doble refracción, sino que también queda sin demostrar que pueda servir como una expresión correcta del fenómeno específico del espato calizo ¹².

La razón básica para pensar de esta manera era que también Brewster creía en la teoría corpuscular de la luz, atribuyendo la aparición de los colores diferentes en el sistema de anillos a la diferencia de las densidades refractivas en la dirección de la propagación de un rayo. Este error fue señalado por Young en una carta que se publicó junto al trabajo de Brewster ¹³. Young no sólo indicó que el fenómeno se debía a la diferencia de densidades refractivas perpendiculares a la dirección del rayo, sino que además,

la dirección de la polarización... debe venir determinada por las densidades refractivas máximas y mínimas en cuestión ¹⁴.

A PESAR DE TODO HUYGENS ESTABA EN LO CIERTO

La crítica era, en efecto, más profunda que las palabras citadas indican, pues Young era defensor de la teoría de las ondas. Thomas Young (1773-1829) fue un sobresaliente hombre de ciencia inglés. Nació en Milnerton, en el Condado de Sommerset, el 13 de junio de 1773, en una familia que perteneció a la Sociedad de Amigos, mejor conocidos por Cuáqueros. A la temprana edad de los seis años tuvo la fortuna, como él mismo diría más tarde, de tener un maestro

¹¹ Brewster, *op. cit.*, p. 219.

¹² Brewster, *op. cit.*, p. 202.

¹³ Brewster, *op. cit.*, pp. 272 y 273.

¹⁴ *Ibid.*, p. 273.

mediocre. Aunque esto parezca paradójico, la realidad fue que ello le forzó a transformarse ya en aquella temprana edad en su propio maestro. Esta cualidad de autodidacta se observa en todos sus trabajos científicos, junto a una enorme intuición. Gozando de una gran capacidad para las lenguas aprendió al mismo tiempo no sólo el inglés, sino el griego y el latín, el francés, el italiano, el hebreo, el persa y el árabe, lenguas que dominó cuando sólo contaba catorce años. Estudió Medicina en Cambridge, donde era conocido por sus compañeros como el fenómeno Young, alcanzando el grado de doctor en Gottingen en 1795. A los veintidós años de edad presentó su primer trabajo científico en la Royal Society, sobre la teoría de la visión. Nombrado ya profesor de Filosofía Natural en la Royal Society, Young presentó a dicha Sociedad su bomba: la conferencia Bakeriana del 12 de noviembre de 1801, titulada *Sobre la teoría de la luz y de los colores* ¹⁵. En dicha conferencia Young hizo público un descubrimiento que iba a tener una trascendencia grande en física, y, a su debido tiempo, en la óptica de los cristales. El descubrimiento era la interferencia de la luz y su interpretación por medio de la hipótesis ondulatoria de luz. El origen de sus ideas las refirió el mismo Young de la siguiente manera:

Fue en mayo de 1801 cuando descubrí, pensando en los bonitos experimentos de Newton, una ley que me pareció explicaba mejor que cualquier otro principio conocido hasta entonces, una gran variedad de fenómenos interesantes. Voy a tratar de explicar esta ley con la comparación siguiente:

Supongamos un número de olas iguales que se mueve sobre la superficie de un lago quieto, con una cierta velocidad constante y que estas olas entran en un canal estrecho que las lleva fuera del lago; supongamos además que otra causa similar ha dado origen a una serie de olas idénticas que entran en el mismo canal por el extremo opuesto con la misma velocidad y al mismo tiempo que las primeras. Ninguna de las series de ondas se destruirán entre sí, pues sus efectos se combinarán. Si entran en el canal de tal manera que las elevaciones de una serie coinciden con las de la otra deben producir una serie de mayor elevación conjunta, pero si las elevaciones de una serie se sitúan de tal manera que corresponden a las

¹⁵ Thomas Young, «On the theory of light and colours», *Phil. Trans.*, 92 (1802), 12-48.

depresiones de la otra, llenarán exactamente dichas depresiones y la superficie del agua quedará plana; al menos, no puedo imaginar otra alternativa ya sea por la teoría o por el experimento. Por lo tanto, afirmo que efectos similares deben tener lugar siempre que dos rayos de luz se mezclen y a esto lo denominó ley general de interferencia de la luz ¹⁶.

El experimento de Young es clásico en física: con un alfiler hizo dos pequeños orificios en un trozo de papel negro y mirando cerca de los agujeros a una cierta distancia de una fuente luminosa observó una serie de anillos alternativamente brillantes y oscuros. Este simple experimento fue tan crucial para la física como el experimento que en 1912 Laue había de llevar a cabo con otro tipo de luz. Con dicho experimento Young demostró al mismo tiempo la naturaleza vibratoria de luz y la existencia de interferencias. Con estas premisas, la óptica de los cristales iba a avanzar por el camino real, aunque no lo hizo inmediatamente debido a la aceptación general de la teoría corpuscular de Newton. La Escuela de Cambridge, no obstante, aceptó inmediatamente la nueva interpretación, y entre sus miembros más distinguidos se encontró Wollaston, al cual ya nos hemos referido en el capítulo VI. William Hyde Wollaston, al que se conocía entre los ingleses como el Papa porque siempre se había probado su infalibilidad en los experimentos o en la interpretación de los mismos, fue el primero que llamó la atención ¹⁷ sobre lo acertado de la teoría de Huygens del espato de Islandia y su interpretación por la teoría de ondas.

Wollaston estaba convencido que la teoría de Huygens era correcta no sólo porque estaba fundada en la idea básica de la teoría de ondas que el experimento de Young había servido para probarla, sino también porque sus propios datos experimentales así lo demostraban:

Las observaciones que he hecho en esta sustancia (espato de Islandia), concuerdan en todos sus detalles con la hipótesis de Huygens; las medidas que he llevado a cabo corresponden mucho más aproximadamente que si se

¹⁶ Thomas Young, *Works*, vol. I, p. 202.

¹⁷ William Hyde Wollaston, «On the Oblique refraction of Iceland Crystal», *Phil. Trans.*, 92 (1802), 381-386.

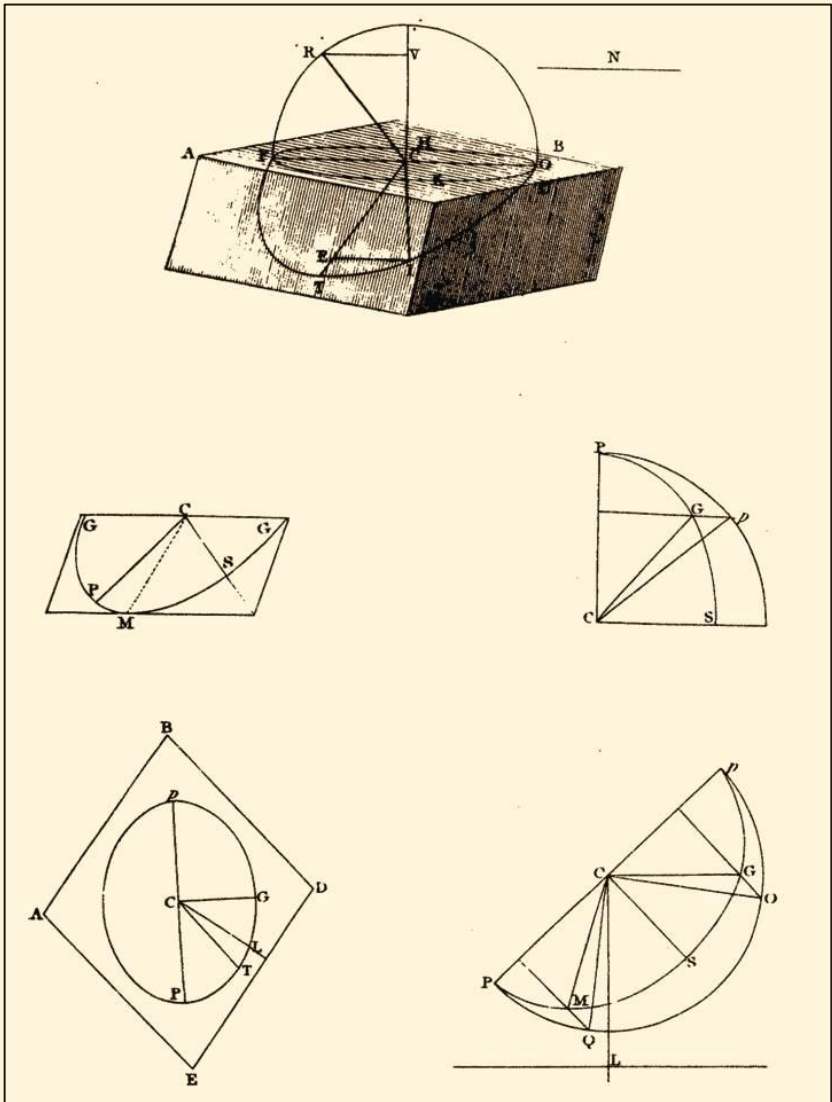


FIG. 40.- *La doble refracción de Wollaston basada en las ideas de Huygens.*

hubiera tratado de una teoría falsa. Todos mis experimentos, excepto el último, se llevaron a cabo antes de haber tenido conocimiento de aquella teoría, y el acuerdo se dedujo por cálculos posteriores ¹⁸,

afirmando finalmente que la teoría de Huygens

merece un mayor grado de consideración que lo que ha recibido hasta hoy¹⁹.

Wollaston, que había inventado un método de refracción total aplicada a las medidas de los índices de refracción ²⁰, llevó a cabo medidas muy exactas de los índices de refracción del espato de Islandia, así como de los ángulos del romboedro del cristal en cuestión.

LA SEGUNDA MEDALLA DE RUMFORD CASI NO LLEGA A TIEMPO

Tengo el gran placer de enviarle a usted la medalla del Conde de Rumford, que se otorga... al autor del descubrimiento más importante o de las mejores teorías relacionadas con el color o la luz. El Consejo de la Royal Society ha pensado rectamente en concedérsela a usted por la aplicación de la teoría ondulatoria de la luz al fenómeno de polarización... Espero, al menos, que usted ya no se quejará del olvido con que nuestro país ha tratado sus experimentos ²¹.

Este párrafo corresponde a la carta que el 18 de junio de 1827 Young dirigió a Augustin Jean Fresnel (1778-1827). Por aquellas fechas, Fresnel, consumido por la tuberculosis, se había retirado a la Ville d'Avray, cerca de París, en una última esperanza de sanar en el campo. La medalla, que no había alcanzado a Malus, esta vez sí llegó a manos de su destinatario por obra de Arago, que refirió el momento con estas palabras:

¹⁸ Wollaston, *On the oblique refraction of Iceland Crystal*, p. 383.

¹⁹ *Ibid.*, p. 381

²⁰ William Hyde Wollaston, «A method of examining refractive and dispersive powers by prismatic reflection, *Phil. Trans.*, 92 (1802), 365-380.

²¹ *Oeuvres complètes d'Augustin Fresnel*, vol. 2 (1868), pp. 778 y 779.

Sus fuerzas casi enteramente perdidas apenas le permitieron lanzar su mirada sobre este testimonio de aprecio tan raras veces concedido por aquella ilustre Sociedad. Todos sus pensamientos estaban dirigidos hacia su próximo fin: todo se concentraba en dicha idea: le agradezco -me dijo con su voz débil-, por haber llevado a cabo su misión, y me doy cuenta de lo mucho que le debe haber costado, pues usted se da perfecta cuenta, ¿no es así?, que la corona más bella vale poco cuando sólo sirve para ser depositada sobre la tumba de un amigo ²².

El 14 de julio, ocho días después, Fresnel fallecía a la temprana edad de treinta y nueve años. No obstante, su corta vida había sido extraordinariamente valiosa, puesto que dicho autor había cambiado de una vez para siempre y en el sentido correcto la interpretación de las propiedades ópticas de los cristales.

Fresnel, que había nacido el 10 de mayo de 1778 en Broglie, Departamento de l'Eure, fue una de las víctimas de la agitación política que Francia sufrió con Napoleón y después de él. Era un monárquico que estaba trabajando como ingeniero civil cuando Napoleón volvió a Francia después de su primera deportación de la Isla de Elba. Durante los «100 días» en 1814 Fresnel perdió su trabajo y fue deportado a una pequeña ciudad de Normandía bajo la vigilancia de la policía. En aquella época su tío, Leonor Mérimier, le escribió una carta ²³ que contenía un consejo:

De vez en cuando se llevan a cabo descubrimientos que prueban que aún queda mucho que pueda llamar la curiosidad del hombre. Por lo tanto, no dejes de lado tus ideas puesto que el descubrimiento te alcanzará

y como una profecía continuaba diciendo:

y tú obtendrás un bello y pequeño diamante que se denominará el *Fresnel*, y que no será menos célebre que el Pitt, el Regente o incluso el Gran Mogol.

¡Y cuán importante iba a ser el diamante de Fresnel!

²² Arago, *op. cit.*, p. 470.

²³ *Oeuvres*, vol. II, pp. 818 y 819 (Carta del 17 de enero de 1814).

Precisamente en la primavera de aquel año Fresnel sintió un deseo que iba a cambiar completamente su vida. Así el 15 de mayo escribió a su hermano Leonor con el siguiente ruego:

Si me puedes regalar la última edición de la Física de Haüy, envíamela inmediatamente. Me gustaría también tener la memoria que se refiere a los descubrimientos de los físicos franceses sobre la polarización de la luz. He visto en el *Moniteur* hace algunos meses que Biot ha leído en el Instituto una memoria muy interesante sobre la polarización de la luz. A pesar de todo el esfuerzo que hago no puedo darme cuenta exacta de qué se trata.

Recibidas las obras pedidas, y en julio de dicho año, Fresnel entraba de lleno en el campo de la óptica, línea de trabajo que le iba a absorber completamente durante trece años, siendo los más productivos los últimos cinco o seis años de su corta vida. Fresnel tuvo el honor de contar con la amistad personal de Arago, con quien publicó algunos trabajos. En su país nativo fue apreciado incluso por sus adversarios científicos, especialmente Biot y Laplace.

Poco antes de su muerte Fresnel comentaba:

Las alabanzas de estas tres eminentes personas me dan en realidad menos satisfacción que el ver mis cálculos confirmados por el veredicto del experimento.

¿Qué era lo que tanta satisfacción daba a Fresnel? El lector podrá contestar a esta pregunta leyendo en las páginas que siguen los descubrimientos de este ilustre científico. Pero antes de entrar en más detalles, vale la pena citar aquí un comentario que Fresnel hizo sobre el trabajo de Newton en relación con la óptica de los cristales, puesto que este comentario revela por sí sólo la filosofía de nuestro hombre:

Tengo la mayor y sincera admiración por la obra de Newton y de Laplace; pero no admito por igual todo lo que han hecho, y no creo, como otros lo hacen, que la óptica de Newton es uno de sus mejores títulos, puesto que contiene numerosos y grandes errores, y las verdades que contiene son mucho más fáciles de explicar que la explicación mecánica de los movimientos celestes. ¡Qué enorme diferencia, en efecto, entre el análisis tan simple de la luz y la visión de Newton al deducir que la precesión de los

equinoccios se debía al achatamiento de la tierra! Su obra inmortal *The Principles* y el descubrimiento del método de los fluxiones son los que le han colocado en la cúspide entre los geómetras y los físicos. Pero, independiente de lo grande que fuera la superioridad intelectual de un hombre tan prodigioso, estaba, no obstante, sujeto a error: uno no puede repetir demasiadas veces que *errare humanum est*. No hay nada más peligroso para el progreso de la ciencia que la doctrina de la infalibilidad ²⁴.

LA ÓPTICA DE LOS CRISTALES SEGÚN FRESNEL

La idea básica que Fresnel introdujo al analizar la óptica de los cristales biáxicos era muy simple, a pesar de que en su tiempo era revolucionaria. Fresnel tuvo la intuición de pensar, en contra de lo que se creía, que el índice de refracción, o su equivalente la velocidad, del rayo ordinario no era constante en dichos cristales. La prueba la logró en septiembre de 1821, y el 21 de dicho mes se lo comunicó por carta a su buen amigo Arago:

Ayer, finalmente, he alcanzado la seguridad de que la velocidad del rayo ordinario de los cristales con dos ejes no es constante, tal como mis ideas teóricas sobre la doble refracción ya habían sugerido de manera tan clara que si los resultados de mis experimentos no lo hubieran demostrado, hubiera tenido que rechazar totalmente mis hipótesis sobre la doble refracción ²⁵.

Sólo cuando tuvo esta prueba experimental. Fresnel tuvo confianza en haber interpretado de forma correcta el rompecabezas que era la óptica de los cristales. Resulta imposible ni siquiera citar sus trabajos más importantes, pues forman un conjunto de tres volúmenes, cada uno de ellos con más de novecientas páginas ²⁶.

Fresnel fundamentó su explicación de la doble refracción y de los fenómenos a que ésta da lugar en las cuatro premisas siguientes:

²⁴ Fresnel, *Oeuvres*, vol. II, p. 485.

²⁵ Fresnel, *Oeuvres*, vol. II, pp. 257-259, carta del 21 de septiembre de 1821.

²⁶ *Oeuvres complètes d'Agustin Fresnel, publiés par les soins du Ministre de l'Instruction Publique*, Paris, Imprimerie Impériale, 1868, Johnson Reprint Corporation, New York, 1965.

1. Las moléculas de éter ejecutan sólo oscilaciones paralelas al frente de onda.
2. Que en un medio que presenta doble refracción, las elasticidades desarrolladas por las vibraciones de la luz cambian un poco con la dirección de los pequeños desplazamientos de las moléculas.
3. Que esta elasticidad es constante allí donde la dirección de desplazamiento es constante, y
4. Que los ejes de elasticidad de las diferentes partes del medio son paralelos.

La primera suposición se refiere solamente a la naturaleza de la luz, es decir, que la luz son vibraciones transversales. Las hipótesis (2) y (3) expresan el concepto de anisotropía elástica y, por tanto, de la óptica de las partículas que forman el cristal, mientras que la (4) meramente expresa la homogeneidad del cristal. Con estas cuatro hipótesis o principios, Fresnel pudo explicar todos los hechos experimentales. Estos cuatro principios fueron enunciados por nuestro autor el 16 de noviembre de 1821 ²⁷.

Fresnel utilizó siempre el método experimental porque, según él:

parece difícil establecer *a priori*, con cierta probabilidad, la ley general de estas elasticidades, y es más sencillo deducir del experimento la ley de velocidades ²⁸.

Para poder deducir las propiedades ópticas de un cristal era necesario estudiar la ley de las velocidades del rayo ordinario y del extraordinario en cristales diferentes, y de esta manera deducir las leyes generales. Siguiendo este método, Fresnel pudo hallar la prueba experimental según la cual la velocidad del rayo ordinario en un cristal biáxico dependía de la dirección, y, por tanto, que no se podía hablar en ellos sino de la existencia de dos rayos extraordinarios.

²⁷ *Oeuvres*, vol. II, núm. XLIII, pp. 369-442, especialmente pp. 441 y 442.

²⁸ *Oeuvres*, vol. 2, p. 317.

Fresnel supuso que las propiedades ópticas de un cristal podían ser descritas mediante un elipsoide, de revolución para los cristales uniáxicos, y de tres ejes para los cristales biáxicos. Este elipsoide es el que hoy se denomina elipsoide de velocidades o indicatriz óptica. Fresnel explicó cómo utilizar su elipsoide de la siguiente manera:

Dado el plano tangente a la onda... es sólo necesario situar el centro del elipsoide y buscar las direcciones y las dimensiones de los dos ejes perpendiculares, o diámetros principales de la sección elíptica producida por este plano en el elipsoide; de esta manera las direcciones de la elasticidad mayor y menor de la sección se han hallado. Es a lo largo de estas direcciones que las vibraciones ordinaria y extraordinaria tendrán lugar, y los planos de polarización serán perpendiculares a aquéllas; las velocidades de propagación vienen dadas por la mitad de dichos diámetros ²⁹.

En los elipsoides de tres ejes, Fresnel decía:

Se sabe que existen siempre dos planos que pasan por el centro del elipsoide cuya sección es un círculo y éstos son los planos que dan la dirección de lo que se llaman los dos ejes del cristal ³⁰.

La originalidad de Fresnel residió en utilizar un elipsoide, ya sea de revolución o de tres ejes, en vez de seguir la idea de Huygens de representar la ley de las velocidades del rayo ordinario y extraordinario independientemente. La razón de esta selección residió en un hecho práctico:

Las velocidades del mismo rayo según sus direcciones forma (en los cristales biáxicos) una superficie de dos hojas de cuarto orden, ecuación que no puede darse en factores racionales de segundo grado excepto en el caso de que dos de los ejes sean iguales... Como las ecuaciones de cuarto grado pueden tener formas diversas, probablemente habría perdido mucho tiempo antes de encontrar la ecuación más conveniente ³¹.

²⁹ *Oeuvres*, vol. II, p. 318.

³⁰ *Oeuvres*, vol. II, p. 320.

³¹ *Oeuvres*, vol. II, pp. 333-334.

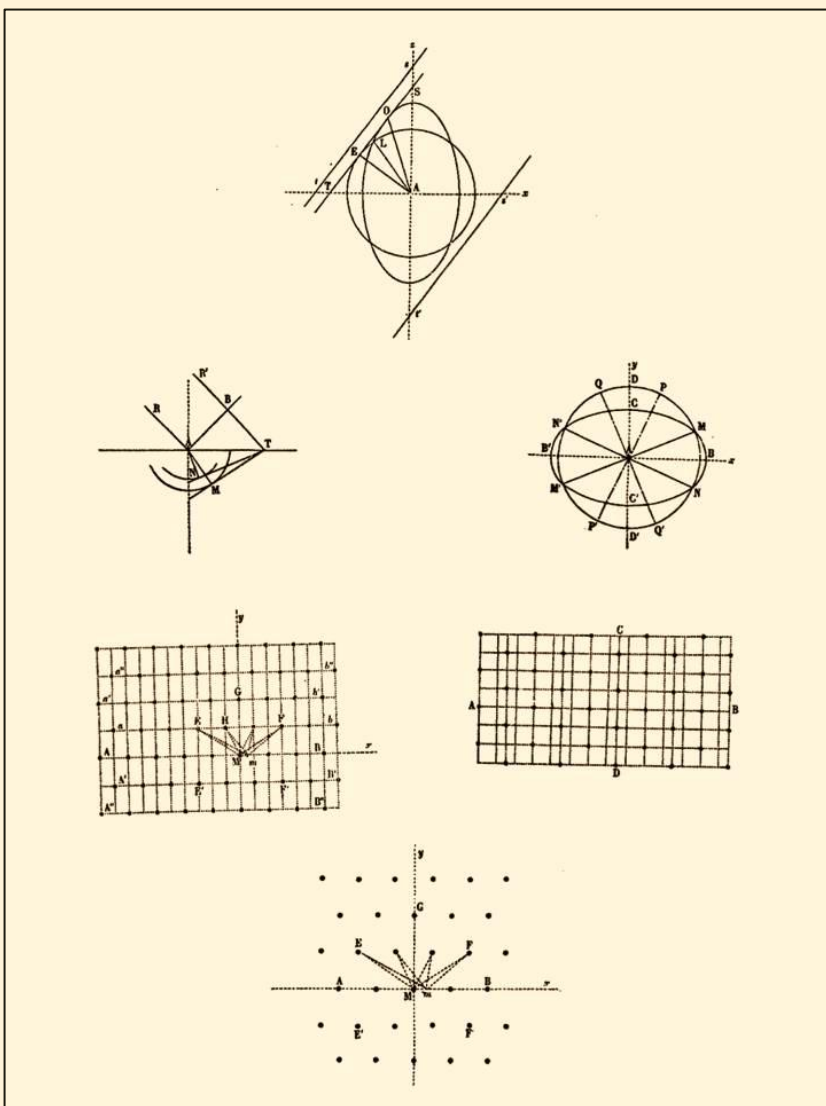


Fig. 41.- Las cuádras de Fresnel y sus redes.

Tratado el problema en estos términos, Fresnel se dio cuenta de que todo era cuestión de manipulación y representación. Así demostró que la superficie de dos hojas de las velocidades de los rayos podía construirse a partir de su elipsoide tomando sobre una misma dirección las velocidades de los dos rayos, dadas por los radios principales de las secciones elípticas. De manera similar, Fresnel indicó que la superficie de onda podía construirse mediante las tangentes a su elipsoide. Es decir, el elipsoide indicatriz contenía toda la información necesaria y sólo era preciso manipularla de forma apropiada.

LA FÍSICA DE LOS CRISTALES

Se ha dicho que «cuando uno considera todas las ideas científicas que debemos a la meditación de la forma cristalina, nos damos cuenta de que el cristal es el campo de los descubrimientos en física» ³². Y realmente así lo ha sido. Una vez se habían comprendido las propiedades ópticas de los cristales y descubiertas que fueron sus relaciones con la morfología cristalina, era lógico esperar que tanto teóricos como experimentalistas se lanzaran a descubrir la física del cristal. Y así vemos una serie continua de descubrimientos que en unas cortas décadas completaron el panorama del comportamiento físico de los cristales y sus relaciones con la morfología y la simetría del cristal. Como consecuencia de estos descubrimientos apareció una ciencia totalmente nueva: la ciencia de la física cristalina. Tan fértil ha sido este campo que aún hoy en día el cúmulo de descubrimientos sigue en aumento, y nuevos hechos se investigan y se interpretan, situación que difícilmente puede encontrarse en ninguna otra rama del frondoso árbol de la ciencia.

Como fácilmente puede colegirse, no todas las ramas de la física cristalina se desarrollaron al mismo tiempo ni de la misma manera. En unos casos, como en la óptica cristalina, que acabamos de analizar, el experimento precedió a la teoría. En otros, como en la

³² Gaston Badulard, "Etude sur l'évolution d'un problème de physique», *Librairie Philosophique*, J. Vrin, París, 1928, 180 pp., especialmente p. 94.

elasticidad o en la conductividad térmica, la teoría vino primero y luego el experimento, que hubo de esperar la técnica precisa. En general, el desarrollo de los diferentes campos fue coetáneo y en realidad íntimamente entrelazado. Por ello es difícil hacer una historia de esta parte de la ciencia de los cristales. Para mayor claridad, es más apropiado tratar cada rama con independencia, indicando sus relaciones mutuas y apoyaturas cuando son necesarias para entender todo el proceso.

En los capítulos que siguen sólo elegiremos unos cuantos temas, pues no pretendemos dar una historia completa del asunto.

11. DEL CALÓRICO A LOS ELIPSOIDES TÉRMICOS

El desarrollo de la teoría de la conductividad del calor por los sólidos se encontró con una encrucijada semejante a la de la transmisión de la luz por los cristales. Como en el caso de la luz, también aquí nos encontramos con dos teorías contradictorias y mutuamente excluyentes. Según un punto de vista, el calor se consideraba como de naturaleza material y atomística. Tales eran, por ejemplo, las ideas de un Galileo o de un Gassendi. Otro punto de vista suponía que se trataba de un movimiento de algún tipo, libre de toda idea material. Esta era la opinión de un Hooke, de un Newton y de un Huygens, para no citar más que a unos personajes bien conocidos. Pero incluso en este caso, el movimiento que producía el calor era algo peculiar, pues, como se hacía constar en edición de 1779 de la Enciclopedia, el movimiento del calor era «del centro hacia la superficie, y del fondo a arriba».

Sin embargo, la idea más generalizada consideraba al calor (o fuego como se llamaba entonces) como un agente independiente de la materia sobre la que actuaba. El descubrimiento de Johann Heinrich Lambert (1728-1777), según el cual cuerpos diferentes reaccionaban de forma diferente frente a la misma cantidad de calor, es decir, su capacidad calorífica, fue interpretada por él mismo como el resultado

de cómo el fuego llenaba un cuerpo dado, y consideraba que su comportamiento distinto era debido a «fuerzas de las partículas de fuego». La idea rectora de esta concepción era que el «fuego» era de naturaleza material. La dificultad inherente a esta concepción residía en que aunque el contenido de su «fuego» variaba, su peso no cambiaba. Con el fin de soslayar esta dificultad se supuso que el «fuego» era un fluido imponderable, cuyas partículas eran pequeñas frente a las partículas atómicas que formaban los cuerpos. Dicho fluido era el «calórico» que se movía libremente a través de los poros de los cuerpos. Vale la pena, con el fin de que veamos los conceptos en los que se basaba la teoría, citar aquí las ideas de Socquet, uno de los más decididos defensores de la teoría del calórico. En su *Essai sur le calorique*¹ leemos:

Un cuerpo que tiene gran afinidad de adhesión para el calórico y que tiene a su vez una distribución muy regular de sus poros, presenta al calórico que llega a él sólo pocas esquinas y escollos que salvar, y por tanto, el calórico alcanzará fácilmente el centro del cuerpo, o el otro extremo si recibe el calórico por un lado; porque el fluido ígneo sólo actúa sobre la superficie de los poros de la segunda capa y así sucesivamente...

La conductividad del calor se basaba, por tanto, en la afinidad del cuerpo para con el calórico y a la presencia de poros, y la velocidad de transmisión del calor dependía de la diferencia de temperaturas entre dos puntos. Si el calórico era material y tenía una afinidad con el material que formaba los cuerpos, debía tener categoría de elemento químico, y así fue reconocido por el célebre químico francés Antoine Laurent Lavoisier (1743-1704), que lo incluyó en su lista de elementos químicos. Pero dicho autor no parecía muy convencido, pues según decía:

rigurosamente hablando no necesitamos suponer que el calórico sea realmente materia: sólo necesitamos admitir... que se trata de una causa repulsiva cualquiera que separa las moléculas materiales y de esta manera podemos deducir sus efectos de forma abstracta y matemática².

¹ Socquet, *Essai sur le calorique*, París, 1801, p. 47.

² Lavoisier, *Traité élémentaire de Chimie*, vol. I, París, Cuchet (1789), pp. 5 y 6.

No todos, sin embargo, creían en dicha época en el calórico. Por ejemplo, el gran matemático Pierre-Simon Laplace (1749-1827) creía que el calor era debido a la agitación de las moléculas, idea que no le impidió publicar un trabajo sobre el calor en colaboración con Lavoisier ³; el americano Benjamin Thomson, Conde de Rumford (1753-1814) llegó a la misma conclusión cuando siendo Ministro de la Guerra en Baviera, observó la cantidad de calor generado en la operación de taladrar los tubos de los cañones ⁴, hecho que constituyó el descubrimiento del equivalente mecánico del calor; en Inglaterra, el polifacético Thomas Young afirmaba en 1807 que el calor, como la luz, debía ser una forma de vibraciones, idea que le surgió al estudiar el efecto térmico de la porción infrarroja del espectro y el calor radiante de un cuerpo rojo. Antes que él, Henry Cavendish (1731-1801) hablaba ya de la generación del calor, idea contraria a su posible naturaleza corpuscular.

CONTINUIDAD Y ECUACIONES DIFERENCIALES PARCIALES

Paradójicamente, la contribución científica real y más importante en cuanto se refiere al conocimiento de la propagación del calor en los sólidos se debió no ya a los que creían en la naturaleza vibratoria del calor, sino de los que siguieron la teoría del calórico. La explicación de este aparente sin sentido provino de que la aceptación de una materia imperceptible e imponderable proporcionaba, al propio tiempo, el concepto de continuidad, y con ello el flujo térmico podía ser tratado mediante el empleo de ecuaciones diferenciales parciales. El problema así planteado se centró en un grupo de ingenieros franceses que a principios del siglo XIX trabajaban en la nueva y dinámica École Polytechnique de París.

El punto de arranque de esta manera de pensar se puede encontrar en Biot. Este físico, que ya hemos encontrado contribuyendo con gran actividad en el campo de la óptica cristalina,

³ Lavoisier y Laplace, *Mémoire sur la chaleur*, 1780. Gauthier-Villars, París.

⁴ Count Rurnford, *Experimental inquiry concerning the source of heat excited by friction*, Proc. Royal Society (1798).

tomó una postura ecléctica con respecto al calórico, posición que podemos reducir a lo siguiente: si bien no conocemos sus causas, nada nos impide que demos una descripción algebraica del fenómeno. Se trataba de introducir una descripción fenomenológica del hecho experimental, dejando para tiempos mejores su interpretación física. Lo que interesaba, según Biot, era que

para medir una causa cuyas modificaciones y forma de actuar son tan poco conocidas, como en el caso del calor, se deben usar sólo métodos muy sencillos, cuya exactitud basada en leyes geométricas, depende sólo de la naturaleza y no de la perfección del instrumento ⁵.

Se trataba de estudiar la transmisión del calor a lo largo de una barra metálica uno de cuyos extremos estaba sumergido en plomo fundido. Para medir la temperatura a lo largo de la barra perforó una serie de huecos a espacios iguales, situando en ellos sendos termómetros de mercurio y llenando el resto de la cavidad con mercurio para asegurar el contacto térmico. Su experimento mostró que los distintos termómetros nunca alcanzaban la temperatura de la fuente calorífica. Su interpretación fue la siguiente:

el exceso de temperatura que se comunica en cada instante, desde el elemento que le precede inmediatamente, compensa exactamente las pérdidas debidas al contacto con el elemento siguiente y las pérdidas por radiación por el aire ⁶,

demostrando que la temperatura T en el lugar x de la barra venía dada por

$$T = Ue^{-x\sqrt{b/a}}$$

donde U es la temperatura de la fuente, y a y b son dos coeficientes que corresponden, respectivamente, al enfriamiento interno y al

⁵ Biot, «Mémoire sur la propagation de la chaleur et sur un moyen simple et exact de mesurer les hautes températures», *Journal des Mines*, XVII (1804), 203, especialmente p. 208.

⁶ Biot, *Traité de Physique* (1816), vol. 4, p. 664.

externo. De ahí dedujo la idea de un flujo térmico, que se podía expresar a base de ecuaciones diferenciales parciales, y Biot resolvió el caso de una dirección.

La contribución más importante en este campo vino de otro francés, Joseph Fourier, quien no sólo dio la solución para un sólido tridimensional, sino que desarrolló una herramienta de trabajo, las series de Fourier, que iban a tener, en este siglo, la mayor importancia para el estudio de la estructura de los cristales. Por esta razón, merece consideración aparte.

FOURIER Y SUS SERIES

Jean Baptiste Joseph Fourier (1768-1830) nació en Auxerre (Francia) el 21 de marzo de 1768. Fourier quería seguir la carrera militar, pero debido al carácter aristocrático del ejército de entonces, y por ser hijo de un sastre, no pudo entrar en la academia militar, por lo que decidió entrar en el seminario. No obstante, su interés era dedicarse a las matemáticas, para las que tenía gran facilidad, aceptando con satisfacción entrar como profesor en la École Normal en 1795. Esta escuela se transformó después en la Escuela Politécnica que ya hemos citado. Fourier no sólo fue un gran matemático, sino que tuvo una carrera política brillante. Ya en tiempos de Napoleón fue nombrado Director del Instituto de Egipto (1798-1801), durante la campaña militar en aquellas tierras. Ya en Francia, fue nombrado Prefecto de Isère (1801-1815), Y fue durante este tiempo cuando desarrolló su teoría matemática de la conducción del calor.

Al principio, su trabajo encontró una serie de dificultades inesperadas al ser rechazada la memoria que presentó a la Academia de Ciencias de París en 1807. Dicha memoria había sido analizada por los mejores matemáticos de Francia, Joseph-Louis Lagrange (1736-1813), Pierre Simon Laplace (1749-1827) y Adrien-Marie Legendre (1752-1833). No obstante, y con el fin de animarle a seguir trabajando en el campo, la misma Academia decidió, poco después de convocar un premio que sería concedido en 1812 sobre la propagación del calor. Fourier revisó su original, presentándolo a la

Academia en 1811. Esta vez el Comité integrado por los tres anteriores, a los que se añadieron Malus y Haüy, aceptó la memoria, y el premio fue concedido a Fourier. Sin embargo, el Comité criticó el método de Fourier, especialmente cuando los aplicaba para llegar a conclusiones. Debido a esta crítica, la memoria no fue publicada. Fourier, convencido de que tenía razón, nunca aceptó las críticas que el Comité le había hecho, y quedó grandemente resentido por el tratamiento injusto, a su juicio, que había recibido. A pesar de todo, continuó con su tema de trabajo, publicando finalmente en 1822 su célebre *Théorie analytique de la chaleur* ⁷, que incluía casi sin cambio su memoria de 1811. Un par de años más tarde, y habiendo fallecido Haüy, Fourier fue elegido Secretario de la Academia, y sólo entonces pudo publicar en dicha institución la memoria que había sido galaronada por la misma ⁸.

La idea básica de Fourier era muy semejante a la de Biot, pues, en efecto, decía:

El conocimiento de las leyes matemáticas que gobierna los efectos (del calor) es independiente de cualquier hipótesis (sobre su naturaleza); sólo pide un examen cuidadoso de los hechos fundamentales ⁹.

El problema fundamental que Fourier trató en su libro fue determinar la temperatura T en un cuerpo homogéneo e isótropo, en función de las coordenadas del punto en el cuerpo y del tiempo t . Fourier demostró que T debía satisfacer la ecuación diferencial parcial

$$\left(\frac{\delta^2 T}{\delta x^2} + \frac{\delta^2 T}{\delta y^2} + \frac{\delta^2 T}{\delta z^2} \right) = k^2 \frac{\delta T}{\delta t}$$

donde k es una constante que depende de la naturaleza del cuerpo. A esta ecuación se la denomina ecuación del calor de un cuerpo en un espacio de tres dimensiones. Para Fourier el análisis matemático no

⁷ Fourier, *Oeuvres*, vol. I.

⁸ Fourier, *Mem. de l'Acad. des Sci.*, Paris (2) 4 (1819-20), 185-555 (publicada en 1824); 5 (1821-22), 153-246 (publicada en 1826).

⁹ Fourier, *Oeuvres*, vol. I, p. 15.

era simplemente una ayuda, una manera de describir el fenómeno, sino que era solidario a la naturaleza del mismo. Para él,

El análisis matemático tiene relaciones necesarias con el fenómeno sensible; su objeto no ha sido creado por la mente humana; es un elemento preexistente del orden universal y no tiene nada de contingente y fortuito; en realidad ha sido impreso en la naturaleza ¹⁰.

Fourier incorporó en su libro, entre otras cosas, un método que iba a tener enorme importancia en el campo de la cristalografía y en la ciencia de los cristales en general. Este avance científico fue su conclusión que cualquier función $f(x)$ podía representarse como

$$f(x) = \sum_{v=1}^{\infty} b_v \sin vx \quad \text{para } 0 < x < \pi \quad [1]$$

La suma se conoce como series de Fourier, en honor de su autor, aunque dicha idea ya había aparecido en la mente de los matemáticos. La verdad es que los matemáticos del XVIII la habían rechazado, con la excepción de Daniel Bernoulli (1700-1782). Fourier aparentemente no conoció el trabajo de sus predecesores, y, por tanto, su obra fue totalmente original.

Fourier señaló que las dos funciones [1] debían ser iguales en un intervalo dado, pero que fuera de dicho intervalo podían ser diferentes. Lo que la serie sinusoidal hace es repetir periódicamente la función en el intervalo comprendido entre 0 y π . Como la mayor parte de las funciones físicas en un cristal son de naturaleza periódica, se comprende que las series de Fourier sean ideales para tratar matemáticamente dichas funciones. Pero este punto y su importancia sólo se reconoció mucho más tarde.

¹⁰ Fourier, *Oeuvres*, vol. I, I, p. 21.

LA INTUICIÓN DE POISSON

El método que Fourier había propuesto fue inmediatamente aceptado y ampliado por otro físico-matemático de la École Polytechnique, Simeon-Denis Poisson (1781-1840). Simeon-Denis había sido atraído al estudio de las matemáticas desde una edad temprana, leyendo el Journal de l'École Polytechnique que su padre recibía como jefe de la comuna local. A pesar de que su padre quería que siguiera la carrera de Medicina, Poisson entró en la École que tanto le atraía, y donde el matemático Lagrange pronto reconoció su valía. En 1802 Poisson fue nombrado ayudante de Fourier, sustituyéndole en la Cátedra cuando Fourier fue elegido Prefecto de Isère.

Pero Poisson, que era un matemático de genio, fue algo más que un simple seguidor de su maestro. En relación a nuestro tema, publicó en 1835 su obra *Théorie mathématique de la chaleur*¹¹, donde trató el problema de la variación del coeficiente de conductividad térmica con la temperatura, dando la respuesta adecuada:

$$c \frac{\delta u}{\delta t} = k \left(\frac{\delta^2 u}{\delta x^2} + \frac{\delta^2 u}{\delta y^2} + \frac{\delta^2 u}{\delta z^2} \right) + \frac{dk}{du} \left(\frac{\delta u}{\delta x} \right)^2 + \left(\frac{\delta u}{\delta y} \right)^2 + \left(\frac{\delta u}{\delta z} \right)^2 \quad [2]$$

con esto y desde el punto de vista teórico el problema estaba resuelto para un cuerpo isótropo.

LA ANISOTROPÍA DE LOS CRISTALES: DUHAMEL

El desarrollo histórico de la teoría de la conductividad térmica en los sólidos constituye uno de esos bellos ejemplos en que parece confirmarse que el desarrollo científico es fruto de la aplicación de una lógica. Primero, tenemos la dependencia de la distancia al foco térmico, después, la dependencia con la temperatura misma. Ahora hacía falta considerar el siguiente punto: el hecho de que los cristales son anisótropos.

¹¹ Poisson, *Théorie mathématique de la chaleur*, Paris, 1835.

Este punto fue introducido por otro matemático de l'École, Jean-Marie-Constant Duhamel (1797-1872), en una memoria presentada a la Academia en 1828, pero que no se publicó hasta unos años más tarde ¹². Para Duhamel la propagación del calor en un cuerpo isótropo era sólo un caso especial de uno mucho más general, que dependía no sólo de la naturaleza de las moléculas que forman el sólido, sino de su distribución en el espacio. Si la transmisión del calor era de molécula a molécula, ¿cómo podía resolver el problema de la continuidad que las ecuaciones requerían? Duhamel resolvió el problema simplemente suponiendo que los átomos se extendían de unos a otros, es decir, que no existía solución de continuidad entre ellos. Para resolver el problema de la anisotropía de la distribución atómica (o molecular) en el cristal, Duhamel generalizó las ecuaciones de Poisson introduciendo ciertos coeficientes que dependían de la dirección, obteniendo su célebre ecuación:

$$\frac{\delta u}{\delta t} = \frac{1}{q} A \frac{\delta^2 u}{\delta x^2} + B \frac{\delta^2 u}{\delta y^2} + C \frac{\delta^2 u}{\delta z^2} + 2D \frac{\delta^2 u}{\delta x \delta y} + 2E \frac{\delta^2 u}{\delta x \delta z} + 2F \frac{\delta^2 u}{\delta y \delta z}$$

donde q es el calor específico de un volumen y A, B, C, D, E, F eran constantes que dependían de la dirección. Como estos coeficientes dependen del sistema coordenado que se elija, Duhamel seleccionó un sistema ortogonal que hacía, al menos, tres de ellos cero. Las direcciones de estos ejes coordenados tenían propiedades especiales, que él mismo especificó:

En toda sustancia cuya conductividad (térmica) varía según una cierta ley que depende sólo de la dirección, existe al menos un sistema de tres líneas perpendiculares entre sí que tienen la propiedad de que todo el flujo (térmico) paralelo a dicho eje puede ser generado por una conductividad constante e independiente del calor. Denominó a estas direcciones *ejes principales de conductividad* ¹³.

En este caso la ecuación [2] se reduce a

¹² Duhamel, *Journal de l'Ecole Polytechnique*, 13 (1832), 326-398.

¹³ Duhamel, *Ibid.*, p. 375.

$$A \frac{\delta^2 u}{\delta x^2} + B \frac{\delta^2 u}{\delta y^2} + C \frac{\delta^2 u}{\delta z^2} = 0$$

donde A , B y C son los coeficientes principales de conductividad.

Al mismo tiempo que Duhamel, otro matemático e ingeniero francés, Gabriel Lamé (1795-1870) estaba trabajando también en este problema. Al año siguiente Lamé indicó que introduciendo un nuevo sistema de coordenadas se podían estudiar otras superficies, específicamente las líneas isotermas, es decir, las superficies que alcanzan la misma temperatura en un tiempo dado ¹⁴. El sistema desarrollado por Lamé ¹⁵ demostró que eran posibles tres familias de curvas, formadas por elipsoides, hiperboloides de una hoja e hiperboloides de dos hojas, todos ellos con los mismos focos.

Partiendo de estas ideas, Duhamel volvió a analizar el problema de la conductividad térmica en los cristales ¹⁶, pudiendo demostrar que sólo en el caso en que la conductividad fuera la misma en todas las direcciones, los elipsoides eran homofocales. En los cristales, por el contrario,

los elipsoides isotérmicos no son homofocales, y las diferencias de los cuadrados de los semiejes correspondientes son proporcionales a las conductividades principales ... Los ejes de los elipsoides isotermos aumentan o disminuyen todos ellos. Pero nada indica que el eje menor permanece en la misma dirección, ni tampoco el mayor, ni el intermedio ¹⁷.

Con respecto al flujo térmico, Duhamel decía:

El flujo de calor que atraviesa un elipsoide isotermo según los ejes está en la relación de dichos ejes ¹⁸.

y además, que

¹⁴ Lamé, *Journal École Polytech*, 14 (1843), 194-251.

¹⁵ Lamé, *Ann. Chimie Phys.* (2), 53 (1833), 190-204.

¹⁶ Duhamel, «Note sur les surfaces isothermes dans les corps solides dont la conductibilité n'est pas la même dans tous les sens», *Journal Mathem. Pures et Appliq*, 4 (1839). 63-78.

¹⁷ Duhamel (1839), p. 68.

¹⁸ Ibid., p. 72.

el flujo de calor que pasa a través de la superficie de un elipsoide isoterma en cualquier punto es proporcional a la perpendicular desde el centro al plano tangente a dicho punto ¹⁹.

La teoría estaba, pues, completa. Sólo hacía falta que el método experimental la corroborase. El propio Duhamel esperaba ansioso este suceso:

Muchos de los resultados que hemos obtenido pueden verificarse por experimento y pueden utilizarse para la determinación de las constantes; yo no creí fuera necesario llevar a cabo siempre estos experimentos. Los físicos todavía no han llevado a cabo experimentos a este respecto, pero existe cierta ventaja en que el cálculo preceda al experimento: el cálculo dirige en el sentido de indicar qué es lo más importante entre los elementos que se necesitan ²⁰.

La prueba experimental no se hizo esperar, gracias a la labor de otro francés, Sénarmont.

LA EVIDENCIA EXPERIMENTAL

Como otros muchos, Henri Hureau de Sénarmont (1808-1862) estaba convencido de que:

parece ser una condición indispensable para tener éxito en la investigación de los sólidos experimentar con sustancias regularmente cristalizadas ²¹.

La dificultad era que los cristales en general son de pequeñas dimensiones y, por tanto, difíciles de medir. Sénarmont pensó que en la situación que él se encontraba era más importante descubrir las leyes generales que averiguar los valores exactos, y decidió utilizar un método semicuantitativo. Debido a ello se decidió por la técnica que ya Jan Ingenhous (1730-1799) había utilizado para mostrar las

¹⁹ *Ibid.*, p. 73

²⁰ Duhamel, *J. Ec. Polytech*, 13 (1832), p. 398.

²¹ H. de Sénarmont, «Sur la conductibilité des substances cristallisées pour la chaleur», *Ann. Chimie et Phys.*, 22 (1848), 457-470.

conductividades relativas de barras metálicas de diferentes metales. Dicha técnica consistía en depositar una fina capa de cera sobre la superficie del cristal y aplicar calor en un punto en el centro de la superficie. De esta manera la cera se fundiría hasta el lugar de la superficie cuya temperatura era igual al punto de fusión de la cera; de esta forma la figura obtenida coincidía con la correspondiente isoterma:

Una vez la placa cristalina se ha enfriado, la curva límite de la fusión es muy clara sobre la cera; de esta manera se puede medir la dirección y magnitud de los diámetros máximo y mínimo de los elipsoides y determinar su orientación sobre los ejes del cristal.

Los defectos del método eran evidentes, pues la fuente de calor nunca era un punto matemático y los límites no eran perfectos; además, debido a la pequeña elipsoidicidad de la figura, la orientación con respecto al eje del cristal no se podía determinar más que de manera aproximada. Pero a pesar de todo, los resultados eran claros, y Sénarmont pudo descifrar el aspecto fenomenológico del problema. Después de haber estudiado varios cristales, dicho autor resumió los resultados de su investigación de la siguiente manera ²²:

1. En todos los medios formados como cristales del sistema regular la conductividad es igual en todas direcciones, y las superficies isotermas son esferas: los cristales del sistema regular son idénticos a los medios que se llaman homogéneos.
2. En todos los medios formados como cristal del sistema prismático recto con base cuadrada o el sistema romboédrico la conductividad alcanza un máximo o un mínimo a lo largo de la dirección paralela al eje de la figura; es la misma en todas las direcciones perpendiculares a dicha dirección y las superficies isotermas son elipsoides elongados o de revolución según la línea de simetría.
3. En todos los medios formados como cristal que se puede describir como perteneciente a un prisma rectangular recto, la conductividad tiene tres valores, máximo, medio y mínimo, según direcciones perpendiculares siempre paralelas a los ejes cristalográficos; las

²² H. de Sénarmont, "Mémoire sur la conductibilité de corps cristallisés pour la chaleur. Second mémoire», *Ann. Chimie et Phys.* (3), 22 (1848), 179-211.

superficies isotermas son elipsoides de 3 ejes que coinciden con los tres ejes de simetría.

4. Todos los medios formados como cristal que pueden describirse como pertenecientes a un prisma rectangular oblicuo la conductividad tiene tres valores diferentes según direcciones perpendiculares entre sí; la primera, siempre paralela al eje cristalográfico perpendicular a los otros dos, mientras que la segunda y la tercera se hallan en un plano perpendicular a esta línea y toman ciertas direcciones, no determinables *a priori*, porque no se puede referir a ningún eje de simetría. Las superficies isotermas son, por lo tanto, elipsoides de 3 ejes desiguales de los que sólo una dirección puede ser predicha.
5. En todos los medios formados como cristal perteneciente al sistema prismático no simétrico es muy probable que la conductividad adquiriera tres valores, máximo, medio y mínimo, según direcciones no determinables *a priori*, porque esta forma no tiene ningún eje de simetría. Las superficies isotermas son entonces elipsoides cuyos tres ejes desiguales tienen direcciones que ninguna ley puede determinar *a priori* ²³.

Sénarmont indicó también las similitudes que existen entre las propiedades ópticas y térmicas de los cristales, en cuanto se refiere a la forma de los elipsoides. Sin embargo, dicho autor indicó que:

Estas analogías son sólo aparentes y el producto de la simetría de las formas y no existe ninguna relación entre ambos fenómenos, o quizás son la consecuencia de una única ley que quizá difiera sólo en las constantes. Estas cuestiones no se pueden contestar por el momento ²⁴.

Finalmente, consideró que sólo el concepto de la estructura cristalina podía proporcionar una respuesta adecuada.

²³ Sénarmont, *Ibid.*, pp. 208-209.

²⁴ Sénarmont, *Ibid.*, p. 211.

LA TEORÍA YA LO HABÍA DICHO

Las dos primeras notas de Sénarmont fueron publicadas en 1847 en *Comptes Rendus de la Academia de París* ²⁵, junto con un interesante informe ²⁶ debido a Biot, que había tomado a su cargo revisar el trabajo de Sénarmont. El informe de Biot iba seguido de una corta nota de Duhamel, en la cual indicaba que las observaciones de Sénarmont estaban de acuerdo con su predicción teórica de 1828.

Como consecuencia de lo interesante de los experimentos de Sénarmont, Duhamel publicó al año siguiente una amplia memoria ²⁷, en la que deducía a partir de su teoría todos los hechos que los experimentos habían mostrado, añadiendo nuevos detalles. El punto más interesante de dicha memoria es lo siguiente:

En un momento dado las superficies isothermas forman una serie continua de elipsoides similares cuyos ejes se dirigen según el eje principal de conductividad, producido por un punto calentado inicialmente y son proporcionales a las raíces cuadradas de las conductividades principales ²⁸,

y esto era independiente de la manera como el calor se introducía; Duhamel llamó a estos elipsoides principales. Las curvas isotérmicas observadas sobre un plano dado,

No son nada más que la sección de este plano con la serie de superficies isothermas. Estas serán, por tanto, elipses similares que tienen un centro común en el punto de intersección entre los planos con el diámetro conjugado a la dirección de dicho plano en la simetría del elipsoide ²⁹.

²⁵ H. de Sénarmont, «Mémoire sur la conductibilité des substances cristallisées pour la chaleur», *C. R. Acad. Scien*, 25 (1847), 459-461.

H. de Sénarmont, «Second mémoire sur la conductibilité des substances cristallisées pour la chaleur», *C. R. Acad. Scien*, 25 (1847), 707-710.

²⁶ «Rapport sur un Mémoire relatif à la conductibilité des corps cristallisés pour la chaleur; présenté par M. H. de Sénarmont», *C. R. Acad. Scien*, 25 (1847), 829-842. Nota de Duhamel, pp. 842-843.

²⁷ J. M. C. Duhamel, «Mémoire sur la propagation de la chaleur dans les cristaux», *J. Ecole Polytech*, 19 (1848), 155-188.

²⁸ *Ibid.*, p. 156

²⁹ *Ibid.*, p. 157.

También Duhamel indicó que:

el influjo máximo en un punto siempre está dirigido según el rayo vector a dicho punto... En un plano dado, el flujo perpendicular al mismo es constante en un momento dado en todos los puntos de la misma curva isoterma... La relación entre el flujo y la temperatura... es proporcional a la distancia del plano de origen, inversa al tiempo e independiente de la dirección del plano ³⁰.

Duhamel trató otros muchos problemas que no son necesarios para nuestra historia; lo que es importante es que la teoría explicaba de manera completa los fenómenos observados por Sénarmont.

La teoría de Duhamel era consistente con la idea de un flujo térmico continuo. Como Chwolson ha indicado, el año 1840 fue el momento en que la hipótesis del calórico fue reemplazada por la idea de la naturaleza cinética del calor. A pesar de todo, la teoría continuó usando y sigue haciéndolo un lenguaje de acuerdo con la idea de la continuidad. La razón de ello estriba en que los fenómenos se observan a escala macroscópica y, por tanto, la discontinuidad a escala atómica y molecular se pierde en la discusión del fenómeno. Algún tiempo después, Lamé publicó una importante obra sobre el tema de la conducción del calor en los sólidos ³¹. Aparte de un tratamiento más riguroso del asunto es interesante señalar aquí en la obra de Lamé el concepto de calor como vibración se aceptaba completamente como indica la siguiente frase:

No se puede entender cómo es posible que los volúmenes elementales que vibran en un líquido no cristalino cesen en sus vibraciones cuando forman parte del cristal ³².

Lamé introdujo el concepto de conductividad angular, es decir, una conductividad de acuerdo con el sistema de coordenadas esféricas que él usaba. Pero en dicho sistema no existe necesidad *a*

³⁰ *Ibid.*, pp. 157-158.

³¹ Gabriel Lamé, *Leçons sur la Théorie analytique de la chaleur*. Mallet-Bachelier, París, 1861.

³² *Ibid.*, p. 304.

priori de que la conductividad a lo largo de direcciones opuestas sea la misma. No obstante, los experimentos indicaban la igualdad de dichas conductividades, aun cuando se puede observar el efecto piroeléctrico. Lamé interpretó este hecho suponiendo que:

La electrización de ciertos cristales por el calor puede ser debida a las desigualdades de las conductividades angulares según direcciones opuestas

³³.

ASPECTO ESTRUCTURAL

No poseyendo ninguna teoría que pudiera explicar la cohesión de los cristales no ya en forma cuantitativa, sino ni siquiera cualitativa, la conductividad térmica se había de relacionar sólo a la evidencia experimental conocida en aquel entonces. Y esta evidencia la suministraba el viejo hecho de la exfoliación. La correlación entre ambas fue explicada de una forma puramente cualitativa por Edouard Jannettaz en 1873 ³⁴. Este autor había mejorado notablemente la técnica experimental y llevó a cabo una serie de observaciones importantes en una gran variedad de cristales. Examinó 44 sustancias diferentes, de las cuales sólo 18 eran ya conocidas. Indicó que:

Se sabe que el calor afecta no sólo al éter, sino también a la materia que forma el cuerpo y que tiene además ondas transversales y se propagan mejor paralelamente que perpendicularmente al plano de exfoliación; por lo tanto, según la hipótesis de Bravais, que parece demostrada por las consecuencias que se han obtenido en este trabajo, la cohesión perpendicular a la exfoliación es mínima y tangente a ella es máxima. El calor, por lo tanto, tendrá menos dificultad en propagarse que en atravesar una dirección de la mayor cohesión o de mayor densidad reticular ³⁵.

Jannettaz dio la siguiente regla:

³³ *Ibid.*, p. 320.

³⁴ Edouard Jannettaz, «Sur la propagation de la chaleur dans les corps cristallisés», *J. Chim. Phys.* (4), 29 (1873), 5-82.

³⁵ *Ibid.*, p. 87.

La exfoliación más fácil o su resultante son paralelas a los ejes de máxima conductividad térmica y viceversa, incluso en el caso de que se presenten tres exfoliaciones. En cristales que pertenecen al sistema clinorrómbico, al menos en los que he examinado, como el plano g es perpendicular a dos exfoliaciones, el eje de mayor conductividad térmica de los dos contenido en el mismo plano se encuentra, en general, en el ángulo agudo formado por las dos exfoliaciones... Esto se demuestra claramente en la tabla ³⁶.

Admitida la naturaleza vibratoria del calor, la teoría se había de desarrollar sobre otras bases. La cohesión y la periodicidad requerían que el calor se propagara según ondas térmicas, pero esto necesita otro tratamiento y no será tratado en este libro.

³⁶ *Ibid.*, p. 71.

CARACTÈRES DES MINÉRAUX.

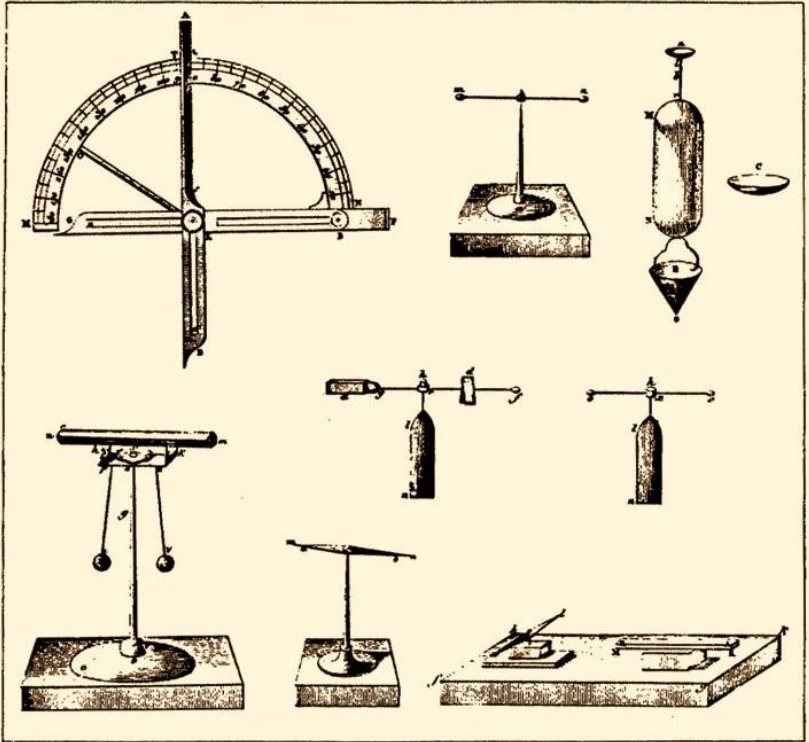


FIG. 42.- Instrumentos físicos de Haüy.

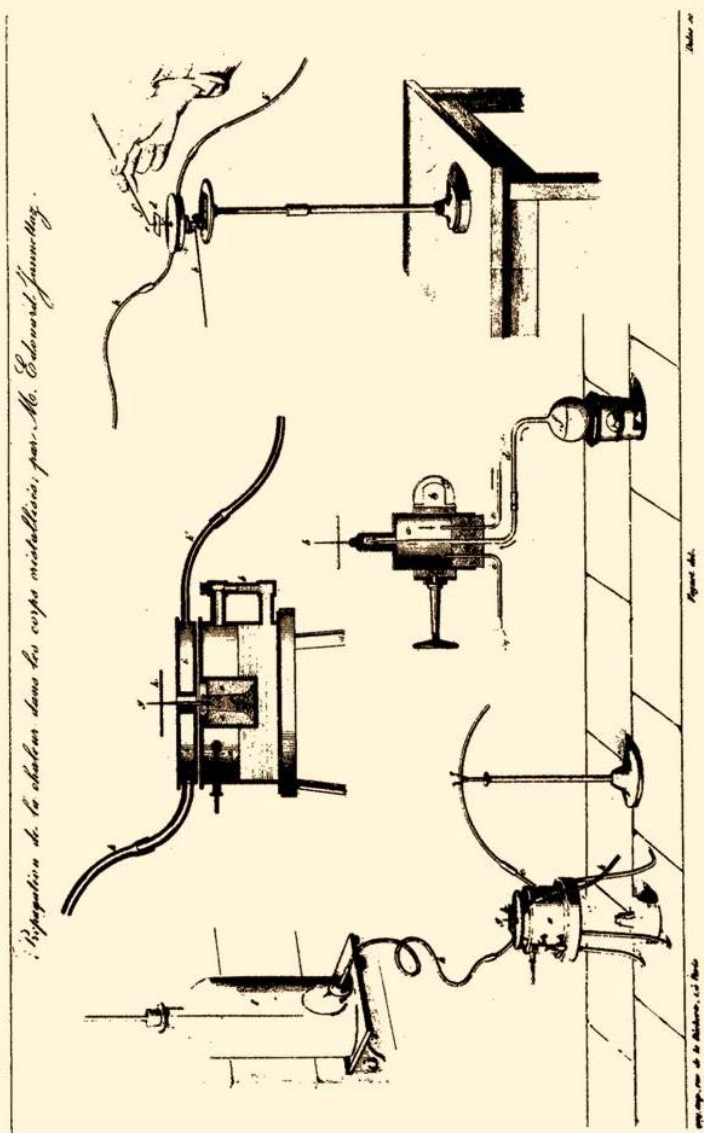


FIG. 43.- Técnica experimental de Jannettaz.

12. EXPANSIÓN TÉRMICA

EXPANSIÓN TÉRMICA DE LOS SÓLIDOS

El problema del calor y sus efectos en los cuerpos constituía un tema de gran interés en el primer cuarto del siglo XIX. Una de las razones de ese gran interés derivaba de la enorme importancia de la máquina de vapor, que por aquellas épocas se transformó en un medio práctico de transformación de energía. La discusión de esta parte del desarrollo de la ciencia y de su aplicación tecnológica queda fuera del contexto de esta obra, pero vale la pena tenerlo en cuenta, pues explica no sólo el interés del tema, sino los múltiples avances que en la teoría y en la práctica se sucedieron en el campo de la termología y la termodinámica por aquellos años.

Entre los fenómenos que se observan al aumentar de temperatura de un cuerpo se encuentra su cambio de volumen, es decir, que un aumento de temperatura viene acompañada de expansión térmica. Este fenómeno se conocía desde hacía largo tiempo y los célebres Experimentos Florentinos que hemos tenido ocasión de citar en otro capítulo de este libro, nos relatan alguno de los experimentos que a este respecto se habían llevado en el siglo XVII.

Sin embargo, no fue hasta que Pierre Louis Dulong (1785-1838) y Alexis Thérèse Petit (1791-1820), ambos estudiantes y profesores después en la École Polytechnique, iniciaron el estudio serio de las leyes que relacionaban la temperatura y el volumen de los cuerpos, que el estudio de los fenómenos de la expansión térmica empezó a tomar forma racional y cuantitativa.

Dulong y Petit publicaron en 1817 una importante memoria ¹ que fue premiada por la Academia. Aparte de la importancia fundamental que dicho trabajo tiene en una historia general de la ciencia, es importante para la nuestra porque contiene dos puntos que marcaron el inicio del nuevo campo del saber. En primer lugar, los autores introdujeron el concepto de coeficiente de dilatación térmica volumétrico, que podía ser medido mediante la variación de altura de una columna de mercurio. El segundo punto de interés es el estudio que llevaron a cabo de la dilatación térmica volumétrica del hierro, del cobre y del platino, es decir de cuerpos sólidos. Dicha determinación la llevaron a cabo en dos intervalos de temperatura, entre 0° y 100° C y entre 0° y 300° C. Lo que buscaban Dulong y Petit era la ley general de la dilatación de los sólidos, que esperaban sería similar a la que en el mismo trabajo habían hallado para los gases y los líquidos. Dichos autores habían encontrado que «los líquidos se expanden proporcionalmente al cuadrado de la temperatura», mientras que «los gases se expanden en progresión geométrica cuando la temperatura aumenta en progresión aritmética». Es decir, que todos los líquidos seguían una misma ley, y lo propio hacían los gases, aunque sus respectivas leyes eran diferentes. Sin embargo, Dulong y Petit hallaron que:

la dilatación de los sólidos aumenta con la temperatura, pero este aumento es distinto para cada uno de los sólidos ².

Es decir, la expansión térmica de los sólidos no seguía una ley uniforme, sino que se comportaban de manera distinta y específica

¹ Dulong y Petit, «Sur la mesure des températures et sur les lois de la communication de la chaleur», *Ann. Chim. Phys.*, 7 (1817), 113-154.

² Dulong y Petit, *Ibid.*, p. 141.

cada uno de ellos. En otras palabras, los sólidos se comportaban de manera distinta a los demás estados de la materia.

ANISOTROPÍA DE LA DILATACIÓN TÉRMICA

La calcita, aquel cristal que había proporcionado el descubrimiento de fenómenos nuevos y trascendentales, tales como la doble refracción y la exfoliación, y que con ello había suministrado la base material de una interpretación y comprensión de la física de los cristales y de su morfología, iba a suministrar un nuevo e inesperado fenómeno.

Mitscherlich, que había descubierto el fenómeno del polimorfismo en 1822 y que estaba interesado en muchos problemas relacionados con la morfología de los cristales, se le ocurrió estudiar, entre 1823 y 1824, los efectos que la variación de la temperatura ejercía sobre la morfología de los cristales. Mitscherlich utilizó para sus medidas un goniómetro de reflexión del tipo que Wollaston había inventado. Con el fin de observar la variación de los ángulos de las caras de un cristal en función de la temperatura, utilizó un baño de mercurio que se mantenía a temperatura constante. El cristal se hallaba parcialmente inmerso en el baño de mercurio, dejando que el mismo alcanzara la temperatura de equilibrio del baño.

Con este esquema experimental, Mitscherlich midió la inclinación mutua de las caras de un romboedro de calcita, observando que el ángulo entre sus caras variaba sensiblemente con la temperatura. Dentro del rango de temperaturas en que Mitscherlich llevó a cabo sus experimentos (operó entre los 19 y 140° Réaumur), observó importantes variaciones de los ángulos interfaciales, ángulos que midió con un error de 30 segundos. Estas observaciones fueron, en realidad, un nuevo golpe contra la teoría de Häüy, puesto que ella postulaba la forma constante de la forma primitiva, y, por consiguiente, de la molécula integrante que formaba el cristal de calcita. La variación de la inclinación mutua de las caras del romboedro indicaba, en efecto, que aquella forma dependía de la temperatura en que se medía. Mitscherlich demostró que el

romboedro de calcita tendía a transformarse en un cubo al elevar la temperatura.

Mitscherlich descubrió también otro fenómeno nuevo. Observó dicho autor que al calentar el cristal de calcita, el ángulo obtuso del romboedro disminuía, lo que indicaba que el eje menor del romboedro se dilataba con mayor rapidez que los diagonales. En otras palabras. Mitscherlich descubrió que la dilatación térmica de la calcita era anisótropa. Del análisis de la variación del ángulo del romboedro, dicho autor pudo calcular la relación entre la variación de ambos ejes, encontrando para el intervalo de temperaturas por él estudiado que era de 0,00325. Sin embargo, el valor del coeficiente de expansión volumétrica, medido por Dulong, era sólo de 0,00196. La única explicación de este hecho era que la calcita se contraía perpendicularmente a su eje al elevar la temperatura, mientras que se dilataba a lo largo de dicho eje. La calcita había proporcionado a Mitscherlich otro hecho imprevisto en el mundo de los sólidos: la existencia, al elevar la temperatura, de contracciones en ciertas direcciones del cristal.

Después de medir una serie de cristales distintos, Mitscherlich publicó en 1824 los resultados de su trabajo ³, que se pueden reducir, en sus palabras, a lo siguiente:

1. Que los cristales que pertenecen al sistema regular y no muestran doble refracción, se dilatan en toda dirección de la misma manera y no presentan variación en sus ángulos.
2. Que los cristales cuya forma primitiva es un romboedro o un prisma hexagonal, se dilatan de manera distinta en la dirección del eje principal y según otra dirección cualquiera.
3. Que los cristales cuya forma primitiva es un octaedro regular o un octaedro rómbico, o en general todos los cristales que presentan doble refracción de dos ejes, se dilatan de manera distinta según tres direcciones.
4. Que la dilatación del cristal viene determinada por los ejes del cristal, y que están relacionados con los ejes ópticos de tal manera que se

³ Mitscherlich, *Ueber das Verhältniss der Form der krystallisirten Körper zur Ausdehnung durch die Wärme*. Ann. Physik (2) 1 (1824), 125-127.

observa lo siguiente: que los ejes menores presentan mayor dilatación que el largo ⁴

Mitscherlich creía en un calórico, o al menos, en un calor material. Su última conclusión estaba de acuerdo con estas ideas que clarificó en un nuevo trabajo ⁵ sobre la dilatación térmica, publicado en 1827. Su estudio comentaba que:

La fuerza repulsiva entre las partículas individuales de materia se aumenta por la introducción de calor; por consiguiente la expansión térmica será mayor en la dirección según la cual los átomos están más próximos.

Fue precisamente en este trabajo en el que Mitscherlich dio por primera vez el valor de $-0,00056$ para 100° C como coeficiente de dilatación perpendicular al eje del romboedro de la calcita. Mitscherlich interpretó la anisotropía de la dilatación térmica como una consecuencia de la anisotropía de la estructura. En efecto, decía que:

Cuando la materia se presenta ordenada de forma idéntica en todas las direcciones, la expansión térmica será la misma en todas las direcciones; sin embargo, si la materia está ordenada diferentemente en direcciones distintas, entonces la expansión térmica será consecuentemente diferente,

y consideró la cohesión en los sólidos como la causa que explicaba los hechos experimentales.

LA IDEA DE SEEBER

Que el fenómeno de la expansión térmica de los cristales estaba en contradicción con los postulados de Haüy estaba claro. Esta contradicción suscitó serias dudas sobre la validez de la teoría de Haüy, según la cual el cristal estaba formado por la agrupación de

⁴ Mitscherlich, *Ibid.*, pp. 126-127.

⁵ E. Mitscherlich, *Ueber die Ausdehnung der krystalisirten Körper durch die Wärme*. Ann. Physik (2) 10 (1827), 137-152.

unidades paralelepípedicas. No se hizo esperar, por consiguiente, alguien que tratara de resolver el dilema que los cristalógrafos tenían ante ellos. Esta persona fue un físico de Freiburg, Ludwig August Seeber (1793-1855), que criticó, en un trabajo ⁶ publicado en 1824, la idea de una estructura de bloques que formaban el cristal. Con el fin de explicar la expansión térmica de los cristales, Seeber introdujo la idea de una estructura formada por átomos o moléculas químicas cuya distancia era una función de las fuerzas atractivas y repulsivas que actúan entre ellas, y el cristal resultante era un sistema de unidades materiales en ciertas posiciones de equilibrio. La variación de la temperatura hacía que estas fuerzas de atracción y repulsión variaran, lo que a su vez obligaba a una reordenación de dichas unidades materiales en nuevas posiciones de equilibrio, lo que se traducía en la dilatación térmica del cristal.

Seeber supuso que las moléculas eran esféricas y que estaban situadas en el centro de lo que Haüy denominaba moléculas sustractivas, afirmando que el cristal estaba formado por

la distribución paralelepípedica de las partes invisibles de la materia.

Esta idea en manos de Delafosse, primero, y de Bravais, después, había de cambiar el concepto de la estructura de los cristales al permitir la introducción del concepto de redes, tal como se dirá en otro capítulo.

EL PRINCIPIO DE NEUMANN

Algún tiempo después de aparecer el segundo trabajo de Mitscherlich sobre dilatación térmica, en el que se indicaban las relaciones existentes entre dicho fenómeno y la birrefringencia de los cristales, Franz Ernst Neumann (1798-1859), profesor de Física de la Universidad de Königsberg, discutía los trabajos de Weiss desde un

⁶ L. A. Seeber, *Versuch zur Erklärung der inneren Baues des festen Körper*, Gilbert Ann. der Physik, 76 (1824), 229.

punto de vista general y basándose en ideas puramente físicas ⁷. La idea rectora de Neumann era que todas las propiedades físicas de los cristales se debían referir a las propiedades cohesivas del cristal, y que, por lo tanto, debían estar necesariamente relacionadas entre sí.

En cuanto se refiere a la dilatación térmica, Neumann introdujo el concepto de «ejes térmicos», análogos a los ejes cristalinos que Weiss había introducido para su interpretación de la morfología cristalina. Neumann decía que

En todo cristal existen tres ejes térmicos mutuamente perpendiculares, a los cuales se pueden referir todas las variaciones de los ángulos entre las caras ⁸.

El concepto de los ejes térmicos tuvo importantes consecuencias en la interpretación de la dilatación térmica de los cristales. La introducción de dicho concepto no sólo fue una aplicación de las ideas de Weiss, sino de las ideas de Fresnel que interpretó las propiedades ópticas en función de las direcciones de elasticidad en el cristal. Cuando Neumann publicó su nota, todavía los datos que existían sobre el fenómeno eran escasos y, en realidad, sólo se conocían datos de cristales rómbicos o de simetría superior, en los cuales los ejes térmicos no cambian de posición con la temperatura. No puede extrañar, por tanto, que Neumann comentara que

es posible, pero muy improbable, que los ejes térmicos tengan movimiento con la temperatura ⁹.

También indicó este autor que una esfera cristalina, bajo la influencia de la temperatura, se podía transformar en un elipsoide cuyos ejes eran precisamente los ejes térmicos que él había concebido. Esta idea fue inmediatamente aceptada por los cristalógrafos como un hecho experimental, más bien que como una consecuencia de una explicación teórica.

⁷ F. E. Neumann, *Auszug eines Schreibens des Herrn Prof. Neumann an Prof. Weiss.*, Ann. Physik (2) 24 (1832), 390-392.

⁸ F. E. Neumann, *Ibid.*, p. 391.

⁹ F. E. Neumann, *Ibid.*, p. 391.

Al poco tiempo, Neumann, ampliando la idea rectora que había utilizado en su nota, trató el fenómeno de la doble refracción en sus relaciones con las fuerzas cohesivas del cristal ¹⁰. Para Neumann las fuerzas cohesivas alrededor de un punto material en el interior del cristal podían variar, pero esta variación podía describirse en función de la simetría del conjunto. De hecho, Neumann supuso que dichas fuerzas cohesivas podían ser descritas como poseyendo tres planos de simetría que dividían el cristal en sectores idénticos y simétricos. A las intersecciones de estos planos, que eran tres y mutuamente perpendiculares, las denominó ejes de cohesión. Como las propiedades ópticas se podían describir también en función de tres ejes mutuamente perpendiculares, Neumann pensó que los ejes cohesivos y los ejes ópticos del cristal debían coincidir. Nuevamente Neumann era influido por los datos experimentales que correspondían sólo a cristales rómbicos o de simetría superior. Con el fin de hallar las verdaderas relaciones existentes entre las propiedades físicas y la simetría era necesario comprobar estas relaciones con cristales de simetría más baja. Neumann lo comprendió así, eligiendo para su estudio el yeso, que por ser monoclinico y bien cristalizado, parecía el adecuado para la prueba.

Su trabajo apareció al año siguiente. Neumann lo inició con una discusión de la deformación de una esfera de material cristalino por efecto de la presión, es decir, su deformación mecánica, indicando que en tales condiciones una esfera cristalina se debía deformar en un elipsoide de tres ejes, que denominó ejes de deformación principales¹¹. Si esto sucedía por efecto de la presión algo similar debía pasar por la acción del calor. De acuerdo con ello:

Debido a la variación de temperatura, la posición relativa de las partículas varía de manera análoga a como lo hace la superficie de una esfera ante la presión: las partículas que en el estado inicial se hallaban en la

¹⁰ F. E. Neumann, *Theorie der doppelten Strahlenbrechung, abgeleitet aus den Gleichungen der Mechanik*. Ann Physik (2) 25 (1832), 418-454.

¹¹ F. E. Neumann, *Die thermische, optischen und krystallographischen Axen des Krystallsystems des Gypses*. Ann Physik (2) 27 (1833), 240-274.

superficie de una esfera, debido a la variación de la temperatura se sitúan ahora en la superficie de un elipsoide ¹²

cuyos ejes son los ejes térmicos que Neumann había definido, con lo que concluyó que:

los ejes térmicos son siempre idénticos a los ejes de deformación ¹³;

de tal manera:

los tres sistemas de ejes, es decir, los ópticos, térmicos y de presión o ejes acústicos, coinciden con el sistema de ejes que puede denominarse como el sistema de ejes cohesivos ¹⁴.

En otras palabras y, siempre según Neumann, las propiedades físicas de un cristal estaban relacionadas entre sí por el sistema de fuerzas cohesivas del cristal, es decir, por su estructura atómica.

La evidencia experimental que proporcionó el estudio del yeso indicó que en los cristales monoclinicos, que en la nomenclatura de Weiss, que Neumann seguía, se denominaban *zwei und zweigliedrig*,

aparecían dos ejes térmicos perpendiculares entre sí en el plano de simetría de la forma ¹⁵,

mientras que en los cristales con ejes perpendiculares, los ejes térmicos coincidían con los del cristal. El caso del yeso indicaba a las claras que tal coincidencia no era fortuita, sino que la simetría del cristal era el factor determinante de la orientación del elipsoide de dilatación térmica.

Neumann pudo entonces afirmar que las propiedades simétricas de la forma cristalina llevan a descubrir las simetrías de las propiedades físicas del cristal. En otras palabras, las propiedades físicas de una sustancia cristalina han de ser consistentes con la

¹² F. E. Neumann, *Ibid.*, p. 244.

¹³ F. E. Neumann, *Ibid.*, p. 245.

¹⁴ F. E. Neumann, *Ibid.*, p. 246.

¹⁵ F. E. Neumann, *Ibid.*, p. 257.

simetría del cristal. Este principio, base de la física cristalina, se conoce, en honor al que lo estableció, como *principio de Neumann*.

DESARROLLO DE LA TEORÍA

Establecidas ya las ideas generales sobre la correspondencia entre las simetrías morfológicas y físicas del cristal, Neumann pasó a entrar en la descripción matemática del fenómeno de la dilatación térmica y establecer el método del cálculo apropiado ¹⁶. En primer lugar, encontró que la expansión volumétrica $\Delta V/V$ era la suma de las expansiones lineales $\Delta R'/R'$, $\Delta R''/R''$, $\Delta R'''/R'''$ a lo largo de los tres ejes, es decir

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{\Delta R'}{R'} + \frac{\Delta R''}{R''} + \frac{\Delta R'''}{R'''}$$

Como no se podían conocer en su época las dimensiones absolutas del cristal, todos los valores se referían a la desconocida $\Delta R'/R'$, con lo que se obtenían unos valores relativos, similares a la relación paramétrica que Weiss había introducido.

En cuanto se refería al yeso, Neumann observó que, dentro de los límites experimentales, los ejes del elipsoide óptico coincidían con los ejes térmicos del cristal, confirmando, en cuanto a él se refería, su teoría. Por otra parte, observó una fuerte contracción según $\Delta R'/R'$, que correspondía al eje del cristal. Además, definió los ejes térmicos como las direcciones según las cuales la dilatación era la mayor, menor e intermedia. Finalmente afirmó que las direcciones de dichos ejes eran constantes para un cristal y que no cambiaban con la variación de la temperatura.

Habían de pasar algunos años para que aparecieran las primeras críticas a las ideas de Neumann. La primera crítica fue debida a las observaciones ¹⁷ de Anders Jonas Angstrom (1814-1874), según las cuales los ejes del elipsoide óptico cambiaban de dirección con la

¹⁶ F. E. Neumann, *Ann. Physik* (2) 27 (1833), 390.

¹⁷ Andr. Jon. Angstrom, *Ueber die Molecular-constanten der monoklinoedrischen Kristallen*. *Ann. Physik* (2) 86 (1852), 206-237.

temperatura, indicando que con toda probabilidad también lo hacía el elipsoide de conductividad térmica que había encontrado Senarmont. Estas observaciones, unidas a la dispersión cruzada que John Herschel (1792-1871) y Johan G. Norrenberg (1878-1862) habían observado en el bórax, estaban en clara contradicción con la idea de Neumann de que el éter lumínico y la materia de los cristales era simétrica según tres planos perpendiculares. Basándose en una serie de observaciones llevadas a cabo en el yeso y los feldespatos, Angstrom llegó a la conclusión que los ejes de elasticidad óptica, de cohesión y de expansión térmica no coincidían en general, en contra de lo que había postulado Neumann, y que, por tanto, se debía abandonar la idea de ejes perpendiculares entre sí como definidores de la morfología del cristal. Las cosas se complicaron todavía más gracias a un trabajo ¹⁸ de Wilhelm Grailich (1829-1859) y de Victor von Lang (1838-1921), en el que se llegaba a poner en duda que los ejes térmicos de cristales monoclínicos y triclínicos fueran realmente ortogonales. Además, dichos autores encontraron errores en los cálculos de Mitscherlich.

Las críticas de Grailich y von Lang habían ido, con todo, demasiado lejos. Convencido de que su padre tenía razón, Carl G. Neumann (1832-1925), tomó cartas en el asunto ¹⁹ revisando con cuidado la situación experimental; y teniendo en cuenta todos los hechos de la simetría de los cristales. El joven Neumann pudo confirmar que su padre tenía razón en que los ejes térmicos eran ortogonales a cualquier temperatura, pero reconoció que, por lo menos, dos de los ejes térmicos del yeso variaban con la temperatura, y que su inclinación con respecto a la morfología del cristal se podía deducir al considerar la variación de los ángulos de las caras del cristal con la temperatura. El eje térmico, cuya dirección no cambiaba, era precisamente el que coincidía con el eje binario del

¹⁸ J. Grailich und V. v. Lang, *Untersuchungen über die physikalischen Verhältnisse kristallisirter Körper*. 4. *Über die Beziehungen zwischen Kristallform, Substanz und physikalischem Verhalten*, Sitz-Ber. Kais. Akad. Wiss. Wien, 33 (1858-59), especialmente: *Über die Formänderung der Kristalle durch die Veränderung der Temperature*, pp. 373-391.

¹⁹ C. G. Neumann, *Über die thermischen Axen der Kristalle des ein- und ein-gliedrigen Systems*. Ann. Physik, 114 (1861), 492-504.

cristal, ratificando el principio que había enunciado su padre y que relacionaba la simetría morfológica con la física.

MEJORAS EXPERIMENTALES

El método experimental que Mitscherlich ideó no era muy apropiado. Por otra parte, como sólo podía medir la inclinación mutua de las caras del cristal en estudio, se necesitaba, para determinar los coeficientes de dilatación, conocer previamente la expansión volumétrica, que requería un experimento y una técnica adicional. Pronto se inventó, sin embargo, un aparato, el dilatómetro, que permitía medir directamente la variación de una barra metálica o cristalina en función de la temperatura. El aparato había sido ideado por J. F. Daniel ²⁰ en 1839 en Inglaterra. El instrumento tenía poca resolución, y además los cristales, en general, eran difíciles de obtener en dimensiones grandes para obviar la pequeña resolución del instrumento. Los cristales necesitaban técnicas mejores a pesar de que Pfaff ²¹ había mejorado ya las introducidas por Mitscherlich; la invención del interferómetro por Fizeau iba a resolver el problema.

EL MÉTODO INTERFEROMÉTRICO DE FIZEAU

Armand Hippolyte Louis Fizeau (1819-1896) fue uno de los mejores experimentalistas de su tiempo y tenía un agudo interés por el estudio de la luz; por ejemplo, fue el primero en lograr una medida suficientemente exacta de la velocidad de la luz y llevó a cabo importantes determinaciones experimentales que sirvieron para dar una base segura a la teoría ondulatoria de la luz. Para nosotros tiene importancia el método inventado por él que, mediante el uso de placas finas, producía interferencias cuya diferencia de camino

²⁰ J. F. Daniel, *Phil. Trans. Roy Soc.*, London (1839), 257.

²¹ F. Pfaff, *Ann. Physik*, 104 (1858). 171; 107 (1859), 148.

correspondía a media longitud de onda. Este método constituyó la base sobre la que desarrolló su método interferométrico ²².

El método que ideó Fizeau era sencillo:

La sustancia que se quiere estudiar debe tallarse de tal manera que presente dos superficies planas y paralelas, el espesor de la placa puede variar entre uno y 10 mm. Un haz de luz monocromática que incida perpendicularmente a la placa da origen a dos rayos reflejados que interfieren dando bandas o anillos de la misma naturaleza que los anillos de Newton; la diferencia es que los anillos son de orden alto... Las bandas se desplazan cuando la lámina cristalina se calienta, y se puede contar exactamente el número y fracción de las bandas desplazadas por la temperatura. .. La observación de estas bandas o anillos de interferencia hace posible determinar cambios en longitud tan pequeños que son imposibles de medir con métodos ordinarios... Un rayo de luz con su serie de ondulaciones de pequeñez extrema, pero al mismo tiempo de gran perfección, puede considerarse como un micrómetro natural de la mayor precisión ²³.

El instrumento ²⁴ fue construido por Soleil. Con él, Fizeau demostró que empleando la luz amarilla del sodio se podían medir variaciones de longitud de $1/33967$ mm., si las bandas se movían sólo $1/10$ de su distancia mutua, medidas desde un punto fijo en la superficie de la lámina. Con este método se podía, por tanto, medir la dilatación térmica de los sólidos con gran exactitud.

Para poder determinar el elipsoide completo de la dilatación térmica se necesitaban al menos llevar a cabo tres medidas, una según cada eje térmico. Sin embargo, si lo que se requiere es determinar la expansión volumétrica, Fizeau demostró que era necesario tan sólo medir una dirección que hiciera $54^{\circ} 44'$ con cada eje térmico.

²² Fizeau, *Récherches sur la dilatation et double réfraction du cristal de roche échauffé*. C. R. París, 58 (1864), 923-932.

²³ Fizeau, *Mémoire sur la dilatation des corps solides par la chaleur*. C. R. París, 62 (1866), 1101-1106.

²⁴ Fizeau, *Ibid.*, *Deuxième partie*. C. R. París, 62 (1866), 1113-1148.

LA SÍNTESIS FINAL: FLETCHER

La síntesis final en cuanto se refiere a la comprensión del fenómeno de la dilatación térmica no se produjo hasta finales del siglo XIX. Esta síntesis se debió a un cristalógrafo inglés, L. Fletcher, que lo resumió en un importante trabajo publicado en la entonces nueva revista, el *Zeitschrift für Kristallographie und Mineralogie*, que había fundado Paul Groth.

La idea rectora que sirvió a Fletcher fue el concepto de homogeneidad cristalina, según la cual las propiedades físicas y geométricas de todas las líneas paralelas en un cristal deben ser iguales. De este concepto se deduce que la serie de partículas estructurales en un cristal que forman una línea debe conservarse como tal aunque varíe la temperatura. En otras palabras, líneas paralelas, que tendrán igual longitud, deben permanecer paralelas y todas ellas ser de la misma longitud; que los planos deben seguir siendo planos y que, en fin, un paralelepípedo debe seguir siendo un paralelepípedo. De este concepto se deduce el principio fundamental siguiente:

La tautozonalidad es una propiedad permanente del cristal ²⁵ cuya consecuencia es que, aunque varíe la temperatura, los índices de una cara son constantes ²⁶.

Como, en virtud de los principios anteriores, la dilatación térmica de un cristal es sencillamente una transformación afín, a la que se aplica la geometría proyectiva

un círculo se transforma en general en una elipse, y una esfera en un elipsoide

²⁵ L. Fletcher, *Über die Ausdehnung der Kristalle durch die Wärme*. Zeit. Krystallog, 4 (1880). 337-352. Esta ley fue enunciada por Grailich y v. Lang en 1858.

²⁶ L. Fletcher, *Ibid.*, p. 340.

cuya ecuación es

$$\frac{x'^2}{\alpha^2} + \frac{y'^2}{\beta^2} + \frac{z'^2}{\gamma^2} = 1$$

cuando se refiere a sus propios ejes, es decir, a los diámetros conjugados del elipsoide. Fletcher indicó que

los ejes del elipsoide son tres direcciones que corresponden a la dilatación mayores, media y menor, respectivamente. En general existen dos, y sólo dos, círculos de la esfera que se transforman en círculos, que corresponden a las secciones cíclicas del elipsoide ²⁷.

Fletcher señaló también que existen dos líneas en un cristal cuya orientación «absoluta» con respecto al espacio cristalino en dilatación permanece invariable; a estas direcciones las denominó *líneas atrópicas* que en general no son perpendiculares entre sí; todas las demás líneas del cristal se mueven. Fletcher también dedujo que en cualquier cristal, incluso aquellos sin plano de simetría, existen muchas tríadas de líneas que tienen los mismos ángulos a temperaturas distintas, pero que sólo una de estas tríadas es rectangular, concluyendo que la dilatación térmica podía describirse de dos maneras:

1. por dilatación lineal según tres líneas rectangulares, o
2. por dilatación lineal según tríadas equiangulares, asociada a una rotación del sistema como cuerpo rígido ²⁸.

No sólo consideró la dilatación normal, es decir, sin modificación de la simetría, sino que indicó Fletcher la posibilidad de una transición de un sistema a otro, producido por la dilatación distinta según ejes del cristal, lo que puede producir un cambio en la relación paramétrica. Sin embargo, recordó que para que se produzca el cambio de un sistema a otro no sólo se requiere la relación

²⁷ Fletcher, *Ibid.*, p. 341.

²⁸ Fletcher, *Ibid.*, p. 352.

paramétrica adecuada, sino que los elementos de simetría del sistema superior deben estar presentes en las moléculas que se mueven de una posición de equilibrio a la otra. De esta manera se podía explicar el polimorfismo como una consecuencia de la dilatación térmica. Es decir, todas las propiedades térmicas del cristal y su estabilidad quedaban indisolublemente unidas.

13. LOS CRISTALES COMO REDES

LA IDEA

La teoría de Haüy postulaba la existencia de un continuo discontinuo. En efecto, las moléculas integrantes se suponían ser cuerpos materiales de forma paralelepípedica constante, y el cristal se concebía como el resultado de la adición continua y sin solución de continuidad de tales cuerpos. Como hemos visto, la dilatación térmica indicaba que la forma de las moléculas integrantes de una sustancia cristalina dada no tenía una forma y dimensiones invariables, sino que dependía, al menos, de la temperatura a la cual se hallaba el sólido cristalino. Por otra parte, la teoría de la elasticidad cristalina necesitaba para su desarrollo conceptual la hipótesis de una distribución molecular periódica, y, en efecto, utilizaba para su formulación una idea de redes, pues consideraba sólo los centros de gravedad de las moléculas que formaban el cristal. Esta idea fue quizás expresada de forma más clara por Fresnel, cuando, para su tratamiento de las propiedades ópticas de los cristales decía:

Todos los físicos conciben un medio elástico como un conjunto de moléculas o puntos materiales separados por intervalos probablemente muy grandes con respecto a las dimensiones de estas moléculas, que se mantienen a una distancia dada debido a la acción de fuerzas repulsivas en equilibrio con fuerza atractivas o compresiones, que tienden a aproximarlas.

Suponiendo esto, imaginemos una distribución regular de moléculas representadas por la figura ¹

La figura a la que Fresnel se refería está reproducida en este libro y representa un conjunto de puntos formando una red bidimensional; dicho conjunto de puntos fue también utilizado en otra ilustración ², lo que revela que Fresnel consideraba la idea de las redes como fundamental para interpretar la física de los cristales. La idea era una consecuencia de las fuerzas cohesivas del cristal, tal como Fresnel lo concebía:

Es difícil para mí concebir la distribución regular de partículas en un sólido, que se conoce como cristalización, sin suponer que las partículas se atraen y rechazan mutuamente más en una dirección que en otra. En otras palabras, que la acción ejercida por cada una de ellas sobre las otras no tiene la misma energía según todas las direcciones alrededor de su centro de gravedad... Es curioso que una simple variación de las distancias de los espaciados moleculares según las direcciones es suficiente para que las fuerzas que actúan contra los pequeños desplazamientos de las filas paralelas a dichas direcciones sean diferentes. Por ejemplo, en un sistema molecular representado en la figura donde los espaciados de las partículas tienen la relación de $2/3$ según las direcciones CD y AB, el desplazamiento de las infinitas filas paralelas a estas direcciones no presentará igual resistencia según las dos direcciones, pero que por el contrario la acción repulsiva de cada partícula tendrá la misma intensidad en todas las direcciones ³.

Idea similar tenía Seeber, como ya hemos visto en el capítulo anterior. A pesar de que era un concepto necesario en el campo de la elasticidad cristalina, no tuvo influencia directa en el desarrollo de una teoría de redes aplicada al estudio de los cristales. En efecto, el desarrollo de la misma pudo originarse una vez que el mineralogista francés Gabriel Delafosse (1796-1878) reconoció que la existencia de las redes era un corolario que se deducía directamente del modelo de Haüy. Como mineralogista que era, e interesado en la física

¹ Fresnel, *Oeuvres*, vol. 2, p. 432.

² Fresnel, *Oeuvres*, vol. 2, p. 508.

³ Fresnel, *Oeuvres*, vol. 2, pp. 440-41.

cristalina, Delafosse no podía considerar el cristal como una abstracción puramente geométrica, sino más bien como el resultado de la agregación de unidades químicas específicas, es decir, las moléculas integrantes de Haüy. Pensó el mineralogista francés que dichas moléculas integrantes eran cuerpos físicos que tenían ciertas propiedades físicas específicas. La idea de la naturaleza reticular de los cristales la expresó en un importante trabajo ⁴ que se publicó en la Academia de París en 1841. En dicho trabajo Delafosse decía que:

Después de haber examinado las consecuencias que derivan de manera directa del fenómeno de la exfoliación, y habiendo demostrado que en el interior del cristal se hallan simétricamente espaciados, de tal manera que muestran en su conjunto una configuración repetitiva, o más exactamente la imagen de una red continua de celdas paralelepípedicas, he mostrado que la molécula integrante de Haüy no es sino el paralelepípedo menor que las moléculas vecinas forman y que determinan sus vértices, o si se quiere, no es nada más que la representación de pequeños espacios intermoleculares o las celdas de la red cristalina. Son, por tanto, totalmente diferentes de las moléculas físicas, que pueden tener y en general tienen otra forma ⁵.

La idea era en verdad sencilla, pero las ideas sencillas son las que han tenido y tienen la mayor importancia en el desarrollo de la ciencia, y en especial, en el desarrollo de la ciencia de los cristales. El momento estaba maduro, y la teoría de las redes se iba a desarrollar de manera completa en poco tiempo, en realidad, en menos de un decenio.

LA CONTRIBUCIÓN DE LOS MATEMÁTICOS

Si hemos de creer a Delafosse, es muy verosímil que su idea de las redes derivara directamente de la hipótesis de Haüy. No obstante, por aquel tiempo, a parte de los físicos, había un grupo de matemáticos que estaban también interesados en el problema de las

⁴ Delafosse, *Recherches relatives à la cristallisation, considérée sous les rapports physiques et mathématiques*, 1er. partie. C. R. 11 (1841), 394-400.

⁵ Delafosse, *Ibid.*, pp. 396-397.

redes, aunque su interés provino del trabajo en un campo aparentemente independiente: se trataba del estudio de los números enteros y en general de la teoría de los números. Por este motivo, y para poder tener una cabal idea de la labor analítica y sintética que Bravais llevó a cabo, debemos considerar antes la labor de los matemáticos puros.

Los matemáticos habían hecho, durante el segundo cuarto del siglo XIX, un considerable avance en la teoría algebraica de las formas cuadráticas binarias y ternarias. En este campo, merecen citarse las contribuciones de Carl Friedrich Gauss (1777-1855) y de Ludwig August Seeber (1793-1855) que ya hemos citado. Aquí nos referiremos solamente a la tesis de este último ⁶, que publicó en 1831 y que Gauss hizo accesible al público en general unos años más tarde ⁷. El interés del trabajo de Seeber reside, precisamente, en que llamó la atención del hecho de que las formas cuadráticas binarias y ternarias son los equivalentes algebraicos de las redes bi- y tridimensionales, respectivamente. Es decir, que se pueden representar como un conjunto regular de puntos distribuidos en filas y planos, que definen un paralelogramo en dos dimensiones y un paralelepípedo en tres dimensiones. Seeber indicó que un conjunto dado de puntos puede ser dividido en una serie infinita de paralelogramos o paralelepípedos, cuya forma puede variar, pero cuya área o volumen permanece constante, definiendo dicho paralelogramo como el paralelogramo elemental en una red bidimensional, y paralelepípedo elemental al cuerpo equivalente en una red tridimensional.

Seeber tuvo, además, la intuición de prever la importancia que las redes tridimensionales podían tener para el estudio de los cristales. En efecto, en sus conclusiones leemos:

Aquí tenemos un campo de investigación que no sólo tiene un enorme interés teórico, sino que puede proporcionar un tratamiento general de

⁶ L. A. Seeber, *Untersuchungen über Eigenschaften der positiven ternären quadratischen Formen*, Freiburg, 1831.

⁷ *Recension der «Untersuchungen über die Eigenschaften der positiven ternären quadratischen Formen, Von Ludwig August Seeber»*, J. Reine angew. Math, 20 (1840), pp. 312-320.

todas las relaciones de las formas cristalinas. Este no es el lugar para entrar en los detalles... En esta dirección estamos orientados por los datos de Häüy, según los cuales la mayor parte de los géneros cristalinos corresponde a un tipo único de valores de los coeficientes de la forma ternaria, que corresponde a un sistema ordenado de puntos; sin embargo, las numerosas medidas de Wollaston, Malus, Biot, Kupfer y otros parecen estar en contradicción con ello y hacen dudar porque cada coeficiente es una relación racional; hemos de recordar que en la teoría no estamos limitados a valores enteros de los coeficientes, es decir, no a su valor absoluto, sino más bien a la relación entre ellos, y, por consiguiente, los resultados de las medidas pueden aproximarse tanto como se quiera ⁸.

Queda perfectamente claro, por consiguiente, que en la mente de Seeber la ley de las intersecciones racionales de las caras de un cristal era una consecuencia de la estructura reticular de los cristales.

EL ERROR DE FRANKENHEIM

Al tiempo que Delafosse hacía pública su idea, Moritz Ludwig Frankenheim (1801-1869), que fue después profesor de Física de la Universidad de Breslau, se había interesado por la cuestión de la cohesión en los cristales. Su tesis, leída en la Universidad de Bratislava, *De crystallinorum cohesione* y que se publicó en 1829, contenía ya una teoría sobre la distribución de moléculas en sólidos, teoría que fue ampliada en su tratado de cohesión ⁹, publicado en 1835. Frankenheim, que seguía las ideas de la cristalografía alemana que Weiss había iniciado, partió de la idea de las perpendiculares a las caras de la forma primitiva como ejes definidores del cristal, pero, como físico que era, les dio connotación física. Así, según nuestro autor, estas líneas eran

la dirección de las fuerzas, en la cual las caras representan el cristal en la manifestación de la cohesión, electricidad, luz, calor, elasticidad ¹⁰.

⁸ *Recensión*, pp. 319-320.

⁹ M. L. Frankenheim, *Die Lehre von der Kohesion*, Vratislav (1835), p. 18.

¹⁰ M. L. Frankenheim, *Einige Satze aus der Geometrie der geraden linien*. Jour. Reine u. angew. Mathematik, 8 (1832), 178-186.

Basándose en la existencia de estas líneas o ejes y sus relaciones angulares, así como tomando sus longitudes como la distancia desde el centro del cristal a la intersección sobre las caras, Frankenheim pudo deducir las formas básicas que eran posibles para cada sistema cristalino. A estas formas les aplicó ahora el concepto que la distribución de las partículas moleculares en el cristal debía ser consistente con la existencia de la forma básica, pues el cristal no era nada más que el resultado del empaquetamiento ordenado y paralelo de dichas formas básicas. Todos estos conceptos y su elaboración le sirvieron al ya profesor de Física de la Universidad de Breslau para escribir su *System der Krystalle* ¹¹, que vio la luz en 1842. Frankenheim concibió «como *Boscovich* y otros» que las partículas que forman el cristal podían ser descritas como puntos matemáticos que equivalen al lugar donde se aplican las fuerzas cohesivas. Todos estos puntos debían ser idénticos y su distribución consistente con las formas básicas que se podían obtener. Cada punto correspondía al centro de la forma básica, y, por tanto, aunque Frankenheim no lo dijo explícitamente, debían formar por apilamiento paralelo una red. Hasta aquí todo iba bien. Pero al deducir cuántas formas básicas podían obtenerse, dijo que

son quince en total, de las cuales tres corresponden a los cristales teserales (cúbicos), dos a los cristales tetragonales, dos a los cristales hexagonales, cuatro a los cristales isoclínicos (rómicos), tres a los cristales monoclínicos, y uno a los cristales triclínicos. Todos los cristales de los seis sistemas pertenecen a quince subdivisiones ¹².

Las formas básicas que pertenecían a cada sistema cristalino eran, según había deducido, las siguientes: para los cristales teserales (cúbicos), el cubo, el octaedro y el granatoedro (rombodecaedro); para los cristales tetragonales, el prisma cuadrático y el octaedro cuadrático; para los cristales hexagonales, el prisma hexagonal y el romboedro; para los cristales isoclínicos (rómicos), el prisma rectangular, el prisma rómbico, el octaedro rectangular y el octaedro

¹¹ M. L. Frankenheim, *System der Krystalle, ein Versuch*. Breslav, Grass Barth und Comp. (1842), 192 p.

¹² M. L. Frankenheim, *Ibid.*, p. 15.

rómbico; para los cristales monoclínicos, el prisma recto romboédrico, el prisma oblicuo romboédrico y el octaedro romboédrico; y finalmente, para los cristales triclínicos, el prisma doblemente inclinado romboédrico.

Según él,

las partículas de los cristales pueden distribuirse según quince tipos diferentes, y estos quince tipos corresponden a las quince formas básicas citadas anteriormente... Este y otros resultados que pueden obtenerse, indican que las partículas de los cristales están simétricamente ordenadas ¹³.

Frankenheim no se dio cuenta de que el prisma oblicuo romboédrico y el prisma romboédrico doblemente inclinado tenían la misma simetría y eran, por tanto, idénticos. Por lo tanto, no eran 15, sino 14, las formas básicas posibles. Debido a este error, la gloria de la invención de las redes cristalinas y su número exacto no pertenece a Frankenheim, sino a un cristalógrafo francés August Bravais, de quien vamos a tratar a continuación.

HACES DE ELEMENTOS DE SIMETRÍA

Que la estructura de los cristales debía ser conforme a redes parecía claro y a dicho concepto convergían las ideas de muchos. Cabía entonces preguntarse qué pasaba con los elementos de simetría generados por las traslaciones de las redes. El primero que trató de contestar a esta cuestión fundamental para la cristalografía fue un ingeniero de obras públicas francés llamado Philippe Breton, que analizó la secuencia de centros de simetría generados por traslación, es decir, formando una red. Dicho autor distinguió dos tipos de centros de simetría: los centros homogéneos y los centros heterogéneos, según tuvieran el mismo o diferente ambiente, es decir, la distribución de puntos a su alrededor. Para el caso de una red bidimensional definida por un paralelogramo, encontró que:

¹³ M. L. Frankenheim, *Ibid.*, p. 15.

si los cuatro vértices de un paralelogramo son centros homogéneos, el centro y los puntos medios de los lados del paralelogramo son centros de simetría ¹⁴.

En el caso de redes tridimensionales, definidas por un paralelepípedo, halló Breton que existían ocho tipos de centros. Dicho autor consideró también las relaciones existentes entre ejes binarios y centros no contenidos en aquéllos, y las relaciones existentes entre plano y centros no contenidos en él. Su trabajo debe considerarse como el inicio del desarrollo de los grupos planos y espaciales, que se había de completar a finales del siglo.

LAS 14 REDES DE BRAVAIS

La respuesta adecuada tanto a la pregunta que se formuló Breton o a la deducción que equivocadamente hiciera Frankenheim se debió a August Bravais (1811-1863), un físico y mineralogista francés, cuyo interés era la simetría de los poliedros. Este autor, justamente un año antes de publicar su teoría de las redes, había descubierto que la simetría de los poliedros convexos pertenecía a 32 tipos de simetría ¹⁵, resultado que, aunque ignorado por Bravais, Hessel había ya obtenido unos años antes. Dicho descubrimiento hace que Bravais merezca entrar en la historia de la ciencia de los cristales, pues la obra de Hessel era prácticamente desconocida, mientras que la memoria de Bravais tuvo profundo impacto en el desarrollo de la cristalografía. Pero si este mérito no fuera suficiente, Bravais coronó su personalidad científica con el desarrollo de la teoría reticular del cristal, teoría que ha sido un jalón definitivo en el desarrollo conceptual de la ciencia de los cristales.

¹⁴ Philippe Breton, *Théorie géométrique des centres multiples*, J. de Mathem. pures et appliquées, 10 (1845), 430-434.

¹⁵ A. Bravais, *Sur les polyèdres symétriques de la géométrie*, J. de Math. Pures et appliquées, 14 (1849), 137-140.

A. Bravais, *Sur les polyèdres de forma symétrique*, J. Mathem. pures et appliquées, 14 (1849), 141-180.

La teoría fue publicada en 1850 en una extensa memoria, titulada *Mémoire sur les systèmes formés par des points distribués régulièrement sur un plan ou dans l'espace* ¹⁶.

Bravais desarrolló su teoría considerando, en primer lugar, un sistema de puntos situados sobre una línea recta a intervalos iguales, intervalo que denominó parámetro de la fila de puntos. Por repetición equidistante y paralela de una fila obtuvo un plano, y por apilamiento de tales planos, obtuvo la red, de la siguiente forma:

Tomamos una segunda red plana de la misma forma y tamaño que la precedente; coloquémosla sobre un plano paralelo, separado del primero por un intervalo arbitrario, pero con cuidado de que todas las líneas homólogas estén dirigidas de la misma manera en las dos redes planas. Esto se puede realizar trasladando paralelamente todas las partes de la red original. Colóquese una serie infinita de redes similares, similarmente orientadas, sobre una serie infinita de planos paralelos al primero; estos planos son todos ellos equidistantes entre sí. Cada red debe hacerse resbalar sobre su propio plano hasta que todos los puntos origen están sobre una línea recta, fuera de la red original. El sistema de puntos así obtenido recibirá el nombre de red en el curso de este tratado; tal sistema es ilimitado en sus tres dimensiones ¹⁷.

Bravais no estaba interesado, sin embargo, en obtener solamente una construcción matemática, sino que deseaba desarrollar un modelo que pudiera ser utilizado para el estudio de los cristales. Con el fin de lograr esta meta, introdujo el siguiente concepto:

Antes de entrar en otras cuestiones, daré un nombre a los puntos que forman una red. Para ello es necesario distinguir entre estos puntos y los puramente matemáticos que existen en una región cualquiera del espacio. Daré a éstos el nombre de nudos reticulares. A estos nudos reticulares se les puede dar, entre otras propiedades, el de ser de dimensiones muy pequeñas.

¹⁶ A. Bravais, *On the systems formed by points regularly distributed on a plane or in space*. Traducción inglesa por Amos J. Shaler, del J. de l'École Polytechnique, 19 (1850), 1-128. Publicada por la Crystallographic Society of America. *Mémoire*, 1, 1949. Reeditada por A. C. A. Monograph, 4, 1969, 113 pp. + prólogo.

¹⁷ Bravais, p. 1.

En el caso real de las moléculas podemos asociar el nombre de nudo reticular al centro de la molécula, quedando indeterminada la forma poliédrica que pueda tener ¹⁸.

La red así definida tenía ciertas propiedades básicas: a saber, que es infinita en extensión y que todos los nudos reticulares que la forman son equivalentes y tienen un «ambiente» idéntico. Por tanto, la red es homogénea. Finalmente, Bravais introdujo el siguiente postulado:

Estos nudos están unidos a los otros por fuerzas, de tal manera que la entera red es invariable, todas las distancias mutuas permanecen inalterables aunque puede ser trasladada en el espacio como un cuerpo rígido, ya sea por traslación o por rotación alrededor de un eje dado ¹⁹.

Una propiedad importante de las redes así definidas es que el volumen del paralelepípedo definido por tres traslaciones no coplanarias (conjugadas) es constante, definiéndolo como el paralelepípedo generador de la red. Bravais descubrió que existen redes para las cuales

la manera como se distribuyen los nudos es distinta, aunque los ejes y los planos de simetría de las mismas son idénticos. Denominaré a estos tipos los modos reticulares de una clase ²⁰,

indicando cómo podía obtener estos distintos modos de una red dada:

todos los distintos modos de una clase pueden obtenerse a partir de un modo dado de la clase por adición de nudos nuevos, ya sea en el centro de la figura del sólido generador, o en los centros de sus caras; estos sólidos se dice que han sido centrados tanto en el interior como en sus caras ²¹.

Bravais, consecuentemente, clasificó las redes posibles en clases, en función de su simetría de la manera siguiente:

¹⁸ Bravais, p. 3.

¹⁹ Bravais, p. 3.

²⁰ Bravais, *Ibid.*, pp. 84 y 85.

²¹ Bravais, *Ibid.*, p. 85.

La gran aventura del cristal

Primera clase. Redes con tres ejes cuaternarios... Existen tres modos distintos:

1. *El cubo.*
2. *El cubo centrado, que puede ser reemplazado por un romboedro de 120° .*
3. *El cubo de caras centradas, que puede ser reemplazado por el romboedro de $70^\circ 31' 44''$, o por un prisma de base cuadrada centrado y cuya altura es igual al lado de la base multiplicado por 2. También se pueden utilizar para derivar este tercer tipo el tetraedro y el octaedro regulares.*

Segunda clase. Redes hexagonales... *Sólo existe un modo, formado por los seis vértices de un prisma recto de base triangular equilátera. El paralelepípedo generador es un prisma recto de base rómbica con ángulo de 60° o 120°*

Tercera clase. Redes tetragonales... *Existen dos tipos posibles:*

1. *El prisma recto con base cuadrada.*
2. *El prisma recto centrado; este prisma puede ser sustituido por un octaedro recto de base cuadrada.*

Cuarta clase. Redes trigonales... *Sólo existe un modo indicado por los ocho vértices de un romboedro.*

Quinta clase. Redes con tres ejes binarios... *Existen cuatro modos distintos:*

1. *El prisma recto con base rectangular.*
2. *El prisma recto con base rectangular, centrado, al cual puede reemplazar el octaedro con base rectangular.*
3. *El prisma recto con base rómbica. Puede ser sustituido por el prisma recto con base rectangular centrado en las dos bases, o sobre las caras laterales paralelas y opuestas.*
4. *El prisma con base rómbica, centrado; puede sustituirse por el octaedro recto de base rómbica, cuyas tres secciones principales son rombos.*

Sexta clase. Redes binarias... *Existen dos modos distintos:*

1. *El prisma recto de base paralelográfica.*
2. *El prisma recto de base paralelográfica centrado. Puede ser sustituido por el prisma recto de base paralelográfica con dos caras laterales centradas.*

Séptima clase. Redes asimétricas... *Sólo existe un modo: el prisma oblicuo de base paralelográfica.*

Habiendo deducido la existencia de 14 redes, y habiendo reconocido su simetría, el problema quedaba totalmente resuelto. Por tanto, y en honor a su descubridor, estas redes se conocen como los 14 *modos reticulares* o *redes de Bravais*.

REDES POLARES

Las redes de Bravais indicaban los modos posibles de agrupación paralela de las partículas que forman el cristal. Su deducción era una consecuencia directa de la realidad periódica del cristal, tal como la genial idea de Haüy había indicado. Los 14 modos eran, por tanto, redes que directamente se referían al contenido material del cristal. Eran, pues, redes directas. Aparte de ellas, Bravais estudió también otros tipos de redes que se podían obtener no ya considerando la periodicidad natural del cristal según líneas, sino la periodicidad derivada de la existencia de planos reticulares. Estas redes nuevas las nombró redes polares. Veamos cómo las obtuvo:

En una red dada -decía Bravais-, trácense las normales a los tres planos conjugados de la red, a partir de un nudo arbitrariamente tomado como origen; sobre cada una de estas tres normales márquense distancias iguales a las áreas de los paralelogramos elementales de las redes planas de dichos planos, divididas por la distancia media entre los nudos reticulares. Si en este sistema de nuevos ejes y con estas longitudes como parámetros se construye una red, esta red es la red polar de la red original ²².

Bravais indicaba que:

Una red dada tiene sólo una red polar, determinada en cuanto hemos elegido el punto que va a ser común a ambas ²³.

²² Bravais, p. 12.

²³ Bravais, p. 97.

y además que:

toda red polar tiene los mismos ejes de simetría que la red original ²⁴.

El cuadro I reúne las redes directas y polares que Bravais dedujo.

La red polar no tuvo, al principio, la importancia que la red directa tuvo. Su aplicación al estudio del cristal se redujo a la curiosidad de su existencia y a su posible aplicación a la proyección gnomónica, herramienta muy útil para la interpretación de la morfología cristalina. No fue hasta el advenimiento de la difracción de rayos X por los cristales que la red polar, que tomó el nombre de red recíproca, cobró toda la importancia que merecía, llegando a constituir la base para la interpretación de dicho fenómeno.

²⁴ Bravais, p. 102.

CUADRO I
LAS REDES DE BRAVAIS

<i>Sistema</i>	<i>Modo de Bravais</i>	<i>Red polar</i>
Cúbico	Cubo sencillo	Cubo sencillo
	Cubo centrado	Cubo de caras centradas
	Cubo de caras centradas	Cubo centrado
Hexagonal	Prisma hexagonal	Prisma hexagonal
	Romboedro	Romboedro
Tetragonal	Prisma de base cuadrada	Prisma de base cuadrada
	Prisma tetragonal centrado	Prisma tetragonal de caras centradas
Rómbico	Prisma recto de base rectangular	Prisma recto de base rectangular de caras centradas
	Prisma recto de base rómbica	Prisma recto de base rómbica
	Prisma recto de base rectangular	Prisma recto de base rectangular
	Centrado	
	Prisma recto de base rectangular de caras centradas	Prisma recto de base rectangular centrado
Monoclínico	Prisma recto de base paralelográfica	Prisma recto de base paralelográfica
	Prisma recto de base paralelográfica centrado	Prisma recto de base paralelográfica de caras centradas
Triclínico	Prisma doblemente inclinado	Prisma doblemente inclinado.

LOS CUERPOS DE DIRICHLET

Aunque el trabajo de Seeber había influido en parte en Bravais, su obra era totalmente original, pues había acometido la deducción de las redes de premisas diferentes. La línea de Seeber fue ampliada por un discípulo de Gauss, Peter Gustav Lejeune-Dirichlet (1805-1859). Dirichlet estaba interesado en el problema de las formas reducidas de las expresiones cuadráticas ternarias, problema equivalente a lo que hoy en día se conoce en cristalografía como el problema de la celda reducida. Este problema consiste en encontrar, entre la multitud de celdas que se pueden trazar en un conjunto de puntos que forman una red, la celda cuyas dimensiones lineales son las menores.

Dirichlet partió en su trabajo ²⁵, publicado el mismo año que lo hacía Bravais, de las relaciones existentes entre las formas algebraicas y las geométricas. En este respecto decía que:

un sistema de puntos ordenados en paralelogramos o paralelepípedos corresponde a un sistema de segundo o tercer grado respectivamente, y una fila infinita de puntos equidistantes en una línea recta corresponde a un sistema de primer orden ²⁶.

Dirichlet indicó que:

un sistema de segundo orden puede dividirse siempre en paralelogramos básicos cuyos lados no son mayores que sus diagonales ²⁷,

y que se obtenían trazando la mediana sobre cada recta que une un punto dado con sus vecinos. Este paralelogramo tiene un área mínima y constante, así como también es constante su forma a través de toda la red bidimensional. Dicho paralelogramo es el paralelogramo reducido de la red. De manera similar,

²⁵ G. Lejeune-Dirichlet, *Ueber die Reduktion der positiven quadratischen Formen mit drei unbestimmten ganzen Zahlen*, J. reine u. angew. Math., 40 (1850), 209-227.

²⁶ Dirichlet, *Ibid.*, p. 211.

²⁷ Dirichlet, p. 216.

Todo sistema de tercer orden puede ser dividido en paralelepípedos cuyas caras son paralelogramos reducidos y cuyos lados, de los cuales siempre cuatro de ellos son iguales entre sí, no son mayores que sus diagonales ²⁸.

Con el fin de obtener dicho paralelepípedo se deben trazar planos por los puntos medios de la recta de unión con sus vecinos. Los paralelepípedos así obtenidos son los paralelepípedos reducidos de la celda, o en otras palabras su celda reducida, que tiene un volumen constante y mínimo, cuya forma es única para una red dada. Puesto que fue el primero en definir estos paralelepípedos reducidos, se conocen como cuerpos de Dirichlet.

La importancia de estos cuerpos no fue comprendida inmediatamente, y fueron «descubiertos» una y otra vez tanto por cristalógrafos como por físicos.

LA TEORÍA DE LOS CRISTALES DE BRAVAIS

Una vez desarrollada la teoría de las redes el siguiente paso fue, para Bravais, desarrollar una teoría del cristal basada en aquellos conceptos. Al año siguiente de haber publicado su teoría de las redes publicó una amplia memoria titulada *Études cristallographiques* ²⁹, en la que trató una serie de problemas de interés general para los cristales. Para él, un cristal era el resultado de la agregación de moléculas de la misma especie, que se mantienen en sus posiciones de equilibrio por la acción de fuerzas atractivas y repulsivas. El término «moléculas de la misma especie» tuvo importancia para el descubrimiento del isomerismo en química; además, molécula de la misma especie significa que:

la disposición geométrica de los átomos que las constituyen es la misma alrededor del centro de gravedad de cada molécula ³⁰.

²⁸ Dirichlet, p. 221.

²⁹ A. Bravais, *Études cristallographiques*, J. de l'École Polytechnique, 20 (1851), 101-276.

³⁰ *Ibid.*, p. 101.

Para él,

no sólo las moléculas de un cristal son semejantes e igualmente orientadas, sino que se distribuyen según líneas rectas y se hallan separadas, en cada fila, por intervalos idénticos ³¹.

Esto es, las moléculas del cristal se distribuyen en redes. Si esto era así, la morfología de los cristales y sus leyes se podían deducir de su teoría reticular, pudiendo decir que,

Las aristas de un cristal, así como las intersecciones de las caras y planos de exfoliación, corresponden a nuestras filas de nudos; las caras de un cristal son planos que contienen estas filas y coinciden con nuestros planos reticulares ³².

Sin embargo, las redes de Bravais siempre tienen un centro de simetría y, por tanto, los planos reticulares paralelos deben ser siempre idénticos. No obstante, la morfología de un cristal hemiédrico, que no presenta planos paralelos idénticos, no era, por tanto, consistente con lo que Bravais postulaba, así como con la ley de simetría que había postulado Haüy. Con el fin de resolver este problema que presentaban los cristales naturales, Bravais consideró que la naturaleza física de las caras cristalinas era lo que determinaba el crecimiento de las caras opuestas que constituye una forma. Para él:

La razón física de las leyes de simetría es que, en el acto de la cristalización, dos caras de la misma especie se mueven de la misma manera hacia el ambiente que las genera y su trama es la misma, y por consiguiente, las fuerzas moleculares que deciden la aposición de capas paralelas sucesivas sobre una capa dada se encuentra otra vez de la misma manera que cuando se formó un plano paralelo en el primer caso. Pero la verdadera naturaleza de este principio indica que... las fuerzas generadoras de las caras de la misma especie no pueden ser completamente idénticas en ambos extremos,

³¹ *Ibid.*, p. 102.

³² *Ibid.*, p. 107.

excepto en el caso en que las caras no sólo sean de la misma especie, sino idénticas ³³.

En relación con la ley de zonas, Bravais indicó que:

Cualquier eje de zona es una fila reticular del cristal (Teorema 5º) y cualquier círculo de zona es un plano reticular de la red polar y viceversa (Teorema 6º),

demostrando de esta manera lo útil que era el concepto de las redes polares en cristalografía. Esta utilidad se mostraba además en la posibilidad de encontrar el paralelepípedo fundamental una vez conocidas las posiciones relativas de las aristas de un cristal ³⁴.

La red explicaba también el fenómeno de la exfoliación y sus razones físicas, puesto que según Bravais:

Manteniendo idénticas todas las demás condiciones, la cohesión tangencial será más fuerte en los planos más densos y la cohesión perpendicular a ella será más débil cuando la separación entre los planos limítrofes sea mayor ³⁵.

Consecuentemente,

La exfoliación más fácil debe ser paralela a planos reticulares de máxima densidad, y si existen dos o tres formas cristalinas, el orden de la exfoliación debe corresponder al orden decreciente de densidades de los planos reticulares correspondientes ³⁶.

La red determinaba asimismo la morfología del cristal porque:

los planos reticulares más propicios para cerrar el cristal son en general los que poseen una densidad reticular más alta ³⁷

³³ *Ibid.*, p. 107.

³⁴ *Ibid.*, Problema VI. p. 138.

³⁵ *Ibid.*, p. 167.

³⁶ *Ibid.*, p. 168.

³⁷ *Ibid.*, p. 168.

Sin embargo, Bravais se dio cuenta de que:

es evidente que la densidad reticular no es el único factor que influye en la formación de una cara en el acto de la cristalización ³⁸.

Es decir, la morfología del cristal no depende exclusivamente de la red, puesto que todas las redes tienen centros de simetría y los cristales habrían de poseer la simetría de las clases holoédricas. Bravais conoció la existencia de los cristales hemiédricos y también conoció la explicación que Delafosse había dado para estos cristales basándose en la existencia de una polaridad en la forma de las moléculas. Bravais quiso analizar entonces las formas posibles de las moléculas. Creyó nuestro autor que dicha forma era poliédrica y que estos poliedros tenían la simetría que él había ya desarrollado en un trabajo anterior en el que describió las 32 clases de simetría. Un cristal era entonces el resultado de la agregación paralela de moléculas poliédricas que tenían una cierta simetría, suponiendo que:

En todos los cristales holoédricos el poliedro molecular tiene los mismos ejes y planos de simetría de la red y un centro de simetría en el centro de su figura ³⁹.

También señaló que:

En los cristales meriédricos se pierde en el poliedro molecular parte de los ejes, centros o planos de simetría de la red ⁴⁰.

Si las moléculas tenían una cierta simetría además de poseer una cierta forma poliédrica cabía preguntarse qué sistema cristalográfico seleccionaría una sustancia dada al cristalizar. Bravais contestó esta pregunta de manera muy sencilla:

Entre los siete sistemas cristalinos, las moléculas de una sustancia dada que cristaliza adoptará la simetría que da el máximo número de elementos comunes con la simetría del poliedro molecular.

³⁸ *Ibid.*, p. 192.

³⁹ *Ibid.*, p. 200.

⁴⁰ *Ibid.*, p. 200.

Bravais se dio cuenta de que este principio no podía tener valor general y que era necesario modificarlo en la siguiente forma:

En el caso en que existan varios sistemas cristalinos que presentan los mismos elementos de simetría para la red y en el poliedro molecular, la cristalización elegirá el sistema de simetría más baja, es decir, seguirá el sistema que deja el mayor grado de libertad entre los seis elementos que definen el paralelepípedo generador ⁴¹.

Si el poliedro molecular tiene una simetría más baja que la red existen entonces diferentes posibilidades para la distribución de las moléculas en la red. Bravais vio en este hecho la razón para la existencia de maclas distinguiendo dos especies basadas en el siguiente principio: *maclas por hemitropía molecular* en la cual las moléculas se pueden superponer pero tienen diferente orientación; y *macla por inversión molecular* en la cual las moléculas no se pueden superponer, sino que una es la inversa de la otra. Ambos tipos de maclas eran diferentes del caso en los que la red gira 180°, como ocurre en la llamada hemitropía reticular, en la cual existe una clara discontinuidad en la red de un individuo a otro.

Con estas consideraciones, y muchas más, Bravais demostró que la teoría reticular del cristal daba cuenta de los hechos que, en su tiempo, se conocían en cuanto a la morfología y exfoliación del cristal y sus agrupaciones simétricas se refiere. No podía esperarse menos que su teoría fuese inmediatamente aceptada, y que el concepto de redes entrara en cristalografía como uno de los hechos más básicos y fundamentales de la ciencia que estamos considerando. Después de Bravais, redes y cristales forman una unidad indisoluble. Sólo faltaba ampliar este concepto hasta sus últimas consecuencias, labor que se realizó en la segunda mitad del siglo pasado.

⁴¹ *Ibid.*, pp. 208-209.

14. DE LOS CRISTALES AL MECANISMO DE LA VIDA

PASTEUR Y EL DESCUBRIMIENTO DE LA DISIMETRÍA

El universo es un conjunto disimétrico y estoy seguro que la vida tal como se manifiesta a nosotros es función de la disimetría del universo o de sus consecuencias ¹.

Este pensamiento de Louis Pasteur (1822-1895) no era un producto de un sentido poético, sino la culminación de largos años de investigación y análisis.

La fama de Pasteur como microbiólogo no debe ocultar el hecho que desde el principio de su carrera científica y a través de toda su vida Pasteur fue un cristalógrafo. Los años más productivos en este campo fueron de 1847 a 1857, pero incluso cuando ya estaba iniciado en los estudios biológicos el interés por los cristales nunca disminuyó, como se revela por lo que dijo en los últimos años de su vida: *«¡Ay si otra nueva existencia viviera! con qué alegría volvería a coger el estudio de los cristales.»*

Pasteur tenía en realidad razones profundas para este deseo, puesto que había descubierto uno de los conceptos más

¹ Pasteur. Vallery-Radot, *Oeuvres de Pasteur*, Masson et Cie. Editeurs.

trascendentales en cristalografía y en química: el concepto de la disimetría.

El punto de partida que permitió la serie de descubrimientos de Pasteur fue una observación aparentemente sin importancia de Mitscherlich. Este autor se había dado cuenta de que:

El paratartrato y el tartrato de sodio y amonio tienen la misma composición química, la misma forma cristalina con los mismos ángulos, el mismo peso específico, la misma doble refracción y, por tanto, el mismo ángulo de los ejes ópticos. Disueltos en agua su refracción es la misma. Pero la solución de tartrato gira el plano de polarización de la luz mientras que la disolución del paratartrato es inactiva como Biot halló para la serie completa de compuestos de estas dos sales. Sin embargo, en este caso la naturaleza y número de los átomos, su distribución y sus distancias son las mismas en ambas sustancias ².

La nota de Mitscherlich había sido presentada a la Academia de Ciencias de París por Biot que había comprobado él mismo los resultados. Pareció como si el tartrato y el paratartrato fueran sustancias idénticas con actividad óptica diferente. ¿Podía ser esto así? En aquel tiempo se conocía que el desarrollo hemiédrico de los cristales se asociaba al poder rotatorio. El mismo Biot había demostrado que algunos ejemplares de cuarzo hacían girar el plano de la polarización de la luz hacia la derecha y otros hacia la izquierda³. Basándose en este hecho, Herschel ⁴ había relacionado el poder rotatorio y la hemiedría, pues halló que eran del mismo sentido; pero había observado al mismo tiempo que al cristalizar la solución del paratartrato los cristales resultantes eran hemiédricos, unas veces de un sentido y otras, en cambio, de otro.

Pasteur analizó de nuevo estas cuestiones en un trabajo para la Academia de Ciencias de París. El trabajo fue entregado al anciano

² Mitscherlich, C. R. Ac. Sc., París, XIX (1844), p. 720.

³ Biot, *Observations sur la nature des forces qui partagent les rayons lumineux dans les cristaux doués de la double réfraction*. Mem. de l'Institut, Math. Phys., 1813-15 (1818), 221-234.

⁴ J. F. W. Hersehel, *On the action of crystallized bodies on homogeneous light, and the causes of deviation from Newton's scale in the tints which many of them develop on exposure to a polarised ray*. Phil. Trans. London (1820), 45-100.

Biot, que había estudiado estas sales, para que lo analizara. Una vez leído el original, Biot invitó a Pasteur a su casa y le pidió que repitiera el experimento. Biot tomó algunos de los cristales que habían servido para el estudio de Pasteur y que el autor novel decía que eran ópticamente inactivos preguntando a Pasteur que le mostrara la diferencia que existía entre dichos cristales y los demás. Demostrada la diferencia y en presencia de Biot, Pasteur preparó la solución de paratartrato, y dicha solución se dejó que cristalizara en uno de los armarios de Biot. Unos días más tarde se habían formado los cristales y Biot pidió a Pasteur que llevara todo el material al Collège de France para que el joven químico pudiera seleccionar los dos tipos de cristales hemiédricos que decía que existían. Una vez separados por Pasteur los cristales derechos de los izquierdos, Biot le preguntó solemnemente que afirmara que los cristales que había recogido en la derecha serían ópticamente derechos y que los que había agrupado en la izquierda serían ópticamente izquierdos. Pasteur afirmó que esto iba a ser así, y entonces el mismo Biot procedió a determinar la actividad óptica de las soluciones. Preparó con todo cuidado las soluciones, preparó el instrumento e incluso sin necesidad de llevar a cabo las medidas exactas Biot reconoció que la predicción de Pasteur era correcta. El momento fue de gran emoción, pues el anciano Biot, cogiendo afectuosamente a Pasteur por un brazo, le dijo:

Hijo mío, he amado tanto la ciencia en mi vida que este momento hace que mi corazón lata de alegría.

Biot tenía razones poderosas para estar emocionado, pues no sólo era testigo de un nuevo descubrimiento, sino que él mismo había intentado convencer durante treinta años a los químicos para que utilizaran el poder rotatorio como una herramienta de trabajo en el estudio de la estructura molecular.

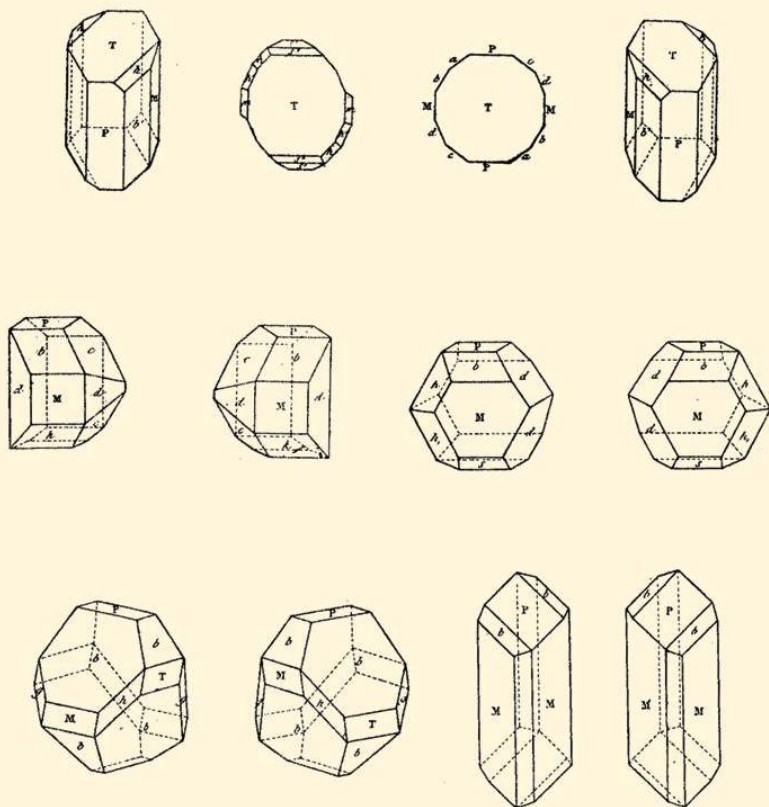


FIG. 45.- Los cristales derechos e izquierdos de Pasteur: Del 1 al 4, tartrato de sodio y amonio; 5 y 6, ácido tartárico; 7 y 8, tartrato amónico; 10 y 11, tartrato potásico, y 13 y 14, tartrato de amonio y antimonio.

LA DISIMETRÍA MOLECULAR

El trabajo de Pasteur fue leído en la Academia el 15 de mayo de 1848 y publicado en los *Comptes Rendus* de la Academia; dicho trabajo fue seguido por una serie numerosa de artículos del mismo autor en la línea del nuevo descubrimiento. ¿Cuál era el sentido y la importancia del descubrimiento de Pasteur? Pasteur había demostrado que todos los tartratos que en disolución eran ópticamente activos eran hemiédricos y que el paratartrato que era inactivo, en realidad era una combinación de igual número de moléculas de dos tartratos idénticos uno ópticamente izquierdo y el otro derecho. También había demostrado que los cristales de una especie eran la imagen especular de los de la otra, y como consecuencia Pasteur pudo afirmar que los paratartratos estaban formados por dos ácidos idénticos cuya actividad óptica era opuesta y, por tanto, se anulaba entre sí. Como racémico y paratartrato eran nombres sinónimos, Pasteur propuso los nombres de ácidos levoracémico y ácido dextroracémico para los dos ácidos idénticos que tienen poder rotatorio opuesto ⁵. Los cristales de los dos ácidos eran morfológicamente idénticos, excepto por la existencia de cuatro pequeñas caras que forman un tetraedro (esfenoide), uno de ellos siendo la imagen especular del otro. También demostró que el poder óptico estaba asociado a una especie de hemiedría que llamó hemiedría no superponible, o como el propio Pasteur dijo:

Como existe una mano derecha idéntica pero no superponible a la mano izquierda ⁶.

La realización de su descubrimiento fue posible gracias a unas circunstancias afortunadas. Pasteur necesitaba para su trabajo cierta cantidad de ácido racémico que ni él mismo ni otros químicos podían preparar, incluso a un precio elevado. Dio la casualidad que Kestner, en Thann, en su día había preparado una cierta cantidad de dicho

⁵ C. R. Ac. Sc., Paris, XXVIII (1849), 477-478.

⁶ Pasteur. C. R. Ac. Sci., Paris, XXXI (1850), 480-483.

ácido, pero por más que lo intentó no pudo repetir la operación química que llevara a la obtención. Sin embargo, Kestner aún tenía en su poder algunos kilos de la sustancia que cedió a Pasteur para su investigación. Este regalo tuvo enorme valor para la ciencia, puesto que proporcionó a Pasteur material abundante con el que poder hacer sus experimentos. La acción generosa de Kestner demuestra a las claras lo importante que es en el campo de la ciencia la cooperación activa de los individuos, puesto que la ciencia no puede avanzar sin su ayuda desinteresada. Indica asimismo la universalidad de los descubrimientos científicos que aunque se lleve a cabo por personas determinadas, no hubieran sido posibles sin el trabajo previo y la ayuda de los demás.

La base del descubrimiento de Pasteur fue, como se ha indicado, la existencia de pequeñas caras que truncaban los vértices de un cristal de una manera que no había sido predicha por ley de simetría de Haüy; el descubrimiento requirió la búsqueda cuidadosa de cristales y la circunstancia de que dichas caras se hallaran presentes. Pasteur, que era un investigador muy detallista, indicó incluso hasta los más nimios detalles de su método:

Añadiré que es necesario separar los cristales de la solución por la mañana, puesto que el aumento de temperatura durante el día redisuelve los cristales en parte, haciendo desaparecer las pequeñas facetas ⁷.

Después de varios años de trabajo Pasteur demostró la generalidad de su descubrimiento, pues no sólo existía una hemiedría no superponible, sino también tetartoedría, donde esto también se cumplía. Indicó además que existen dos clases de sustancias ópticamente activas. En unas, como el cuarzo, por ejemplo, que es ópticamente activo, mientras que la sílice no lo es, debe su actividad a la distribución geométrica espacial de las partículas estructurales en los cristales, mientras que en otros casos, tales como las sales del ácido tartárico, es la disimetría molecular lo que da lugar a la actividad óptica. Pasteur concluyó:

⁷ Pasteur, Ann. Chim. Phys., XXVIII (1850), 56-99, especialmente p. 59.

Todos los productos artificiales obtenidos en el laboratorio tienen una imagen superponible. Por el contrario, la mayoría de los productos orgánicos naturales, yo casi diría que la totalidad de sus productos si he de citar sólo los que juegan un papel importante en los fenómenos de la vida vegetal y animal son disimétricos y es lo que hace que existan disimetrías que hacen que sus imágenes no se puedan superponer ⁸.

Es decir, el mundo orgánico es disimétrico y sólo de un sentido. Con ello, la cristalografía entraba en la explicación de un hecho fundamental asociado al origen mismo de la vida y su evolución.

⁸ Pasteur, *Sur une distinction entre les produits organiques naturels et les produits organiques artificiels*, C. R. Acad. Sci., Paris, LXXXI (1875), 128-130.

15. DE REDES A GRUPOS ESPACIALES

LA REPRESENTACIÓN ANALÍTICA DE LOS GRUPOS: JORDAN

El trabajo de Bravais sobre la deducción de las 32 clases cristalinas ¹ era, en realidad, un estudio de los grupos de movimientos llevados a cabo mediante el empleo de una serie de elementos (operadores) de simetría, que pasando por un punto pudieran originar todos los tipos posibles de las simetrías que presentan los cuerpos geométricos que limitan la forma externa de los cristales. Desde el punto de vista matemático, el estudio consiste en la investigación del grupo de transformaciones lineales con tres variables; es decir, la solución de una serie de ecuaciones, tales que

$$a_{i1}x + a_{i2}y + a_{i3}z, \text{ para } i = 1, 2, 3,$$

y cuyo determinante valga +1 ó -1. La aplicación de estas operaciones de transformación llevó a Bravais, como hemos visto, a

¹ A. Bravais, *Mémoires sur les polyèdres de forme symétrique*, J. math. pures et appliquées, 14 (1849), 141 - 180.

A Bravais, *Note sur les polyèdres symétriques de la géométrie*, J. math. pures et appliquées, 14 (1849), 137-140.

la determinación de las 32 clases cristalinas. El desarrollo que Bravais siguió impresionó al matemático francés Camille Jordan (1838-1922), que se interesaba en la teoría matemática de las sustituciones ². Jordan introdujo en cristalografía los conceptos de isomorfismo (isomorfismo de sustancias holoédricas) y de homomorfismo (homomorfismo meroédrico, es decir, por maclas de cristales no holoédricos), conceptos que tuvieron importancia grande en el desarrollo de la teoría cristalográfica. Con todo, la importancia real de Jordan en el campo que nos ocupa deriva de que fue el primero en llevar a cabo una investigación amplia de los grupos infinitos ³.

El punto inicial de su disquisición fue el siguiente:

Es sabido que cualquier movimiento de un cuerpo sólido en el espacio es un movimiento helicoidal y que este movimiento se conoce cuando se da: 1) la posición en el espacio del eje de giro A y su deslizamiento; 2) el ángulo r que el sólido gira alrededor de dicho eje; 3) su desplazamiento longitudinal t en el sentido de dicho eje ⁴.

La introducción del movimiento helicoidal, o lo que es su equivalente, el eje helicoidal, tuvo tremenda importancia en cristalografía, porque demostró que el concepto de homogeneidad, tal como lo postulaba Bravais, es decir, el paralelismo de las moléculas en el cristal, no era necesario, sino tan sólo un caso particular del general. De acuerdo con las ideas de Jordan, se deducía que la homogeneidad requería solamente que las moléculas fueran iguales, pero que su orientación podía variar, con tal que viniera determinada por un movimiento helicoidal. Con este concepto como herramienta, Jordan pasó a deducir los grupos de movimiento que pertenecen al ámbito cristalino. En terminología moderna, Jordan inició la teoría de los grupos espaciales de los cristales.

El problema que Jordan se proponía resolver era sencillamente determinar todas las formas posibles de agrupación de moléculas,

² Camille Jordan, *Traité des substitutions et des équations algébriques*, París, 1870.

³ C. Jordan, *Mémoire sur les groupes de mouvement*, *Annali di Matematica* (11), 2, (1869), 167-215; 322-345.

⁴ C. Jordan, *Ibid.*, p. 167.

que pueden superponerse por un movimiento generalizado, para lo cual era necesario primero determinar las componentes del movimiento y su asociación. Una vez determinados los distintos tipos de ejes en general, Jordan inició la investigación sistemática de los grupos posibles. Analizó primero los grupos que podían formarse por asociación de traslaciones puras y movimientos de rotación, y luego extendió estos criterios a giros generalizados, llegando a la conclusión de que existían 16 grupos planos y 174 grupos tridimensionales, de los cuales 23 los consideró, en función de sus elementos de simetría, como grupos principales. De estos 23 grupos se podían deducir los demás, introduciendo parámetros de giro o traslación de dimensiones infinitamente pequeñas, o que contuvieran sólo una parte de los movimientos o elementos de simetría de los grupos principales, es decir, lo que denominó grupos meroédricos.

EL DESARROLLO DE SOHNCKE

Mientras Jordan, en Francia, desarrollaba sus 174 grupos, al otro lado del Rhin los cristalógrafos alemanes también se interesaban en la deducción de los grupos de simetría de los cristales. La idea desarrollada por Christian Wiener ⁵ (1826-1896) era muy similar a la que había servido a Jordan como punto de arranque. Wiener señaló que, con el fin de obtener un sólido homogéneo en sentido cristalográfico, no era preciso que las moléculas que lo formaban se apilaran paralelas unas a otras, sino sencillamente que fueran simétricas según un cierto elemento de simetría. Era la misma idea que, aunque había sido ignorada por Bravais, Jordan había visto unos años más tarde.

El siguiente paso en esta línea se debió a Leonhard Sohncke (1842-1897), y específicamente su trabajo *Die regelmässige ebenen Punktsysteme* ⁶, publicado en 1873.

⁵ Chr. Wiener, *Grunzüge der Weltordnung* (1863), p. 86. También en *Atomenlehre* (1869), pp. 82 y ss.

⁶ Leonhard Sohncke, *Die regelmässige ebenen Punktsysteme van unbegrenzter Ausdehnung*, J. Mathem., 77 (1873), pp. 42-101.

Sohncke tenía la idea de deducir todos los sistemas regulares de puntos de extensión infinitos, es decir, una ampliación de las ideas de Bravais. Según Sohncke:

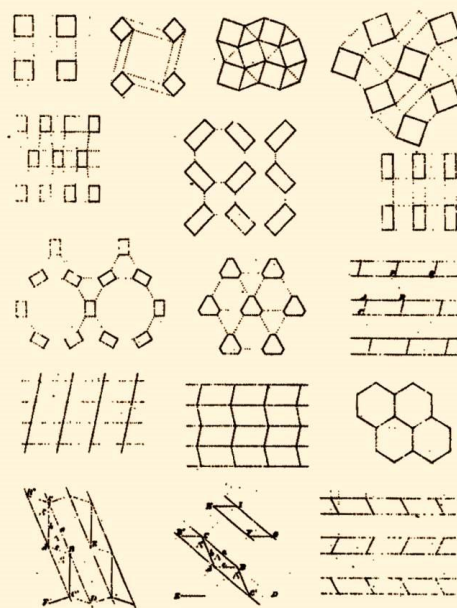
Un sistema de puntos de extensión infinitos se llama regular cuando el haz de líneas que emergen de todos los puntos es congruente o en parte congruente o en parte simétrico ⁷.

Sohncke inició su estudio con el problema, más sencillo, de los grupos planos. La idea era aplicar a una red plana un polígono dado en una orientación específica y deducir todas las formas posibles de agrupación de tales polígonos en un plano. Dedujo así 10 grupos planos que en realidad eran 13 si se contaban adecuadamente, y que podían clasificarse en los siguientes grupos:

1. *Sistemas con triángulos equiláteros, que o son paralelos entre sí y con sus centros en los nudos de una red regular triangular (sistema III) o con lados paralelos conectados (sistema I) o simétricos (sistema II) en los nudos de una red plana exagonal regular.*
2. *Sistemas con cuadrados que son paralelos (sistema IV) o simétrico (sistema V) en los nudos de una red cuadrada.*
3. *Sistemas con rectángulos (o cuadrados) que son paralelos entre sí y situados en los nudos de una red rómbica, con los lados paralelos a la diagonal de la red (sistema VI); o paralelos en los nudos de una red rectangular, con los lados paralelos a los de la red (sistema X); o en los puntos de una red cuadrada con los lados alternativamente paralelos a la diagonal de la red (sistema VII); o en los puntos de una red regular exagonal o triangular con una especie de sus lados paralelos a la red triangular (sistema VIII).*
4. *Sistemas con exágonos semirregulares y paralelos que están situados en los lados de una red triangular equilateral, con los lados paralelos a los de la red (sistema IX) ⁸.*

⁷ Leonhard Sohncke, *Ibid.*, p. 43.

⁸ Leonard Sohncke, *Ibid.*, p. 62.



Leib. Anst. v. Leopold. Hitzig in Berlin

FIG. 46.- Los grupos planos de Sohncke.

Los trece grupos que Sohncke derivó se reproducen en la figura 1 del trabajo original. El resto del trabajo se refiere al desarrollo de los grupos espaciales. Dicho desarrollo fue expuesto de manera más amplia y completa y en forma de una teoría en el libro *Entwicklung einer Theorie der Krystallstruktur*⁹, que él mismo, Sohncke, publicó unos años más tarde. Sohncke definió el cristal como

Un sistema de puntos regular e infinito, es decir, en el cual la ordenación alrededor de cada punto másico es la misma, así como en cualquier otro punto másico del conjunto.

⁹ L. Sohncke, *Entwicklung einer Theorie der Krystallstruktur*. Leipzig (1879), 248 pp.

En otras palabras, un cristal, según Sohncke, se caracteriza por un ambiente igual de los lugares atómicos alrededor de un átomo dado en donde la palabra átomo debe ser considerada en general, es decir, como una molécula o un grupo atómico. Sohncke consideró que existían tres clases principales de movimiento, a saber, el movimiento de traslación, el de rotación y el de deslizamiento, la combinación de los cuales se origina de los distintos sistemas regulares de puntos. El tipo y combinación de las diferentes clases de movimiento debía ser consistente con la simetría que permitían los sistemas cristalinos y que Sohncke consideró correspondiente a las siguientes:

- I. Sistemas sin eje.
- II. Sistemas con sólo un eje de simetría. Las diferentes posibilidades derivan en este caso de la existencia de un eje principal de orden 6, 4, 3 y 2.
- III. Sistemas con ejes principales iguales según dos direcciones opuestas. Aquí de nuevo el eje principal podía ser de orden 6, 4, 3 y 2.
- IV. Sistemas con ejes principales iguales en más de dos direcciones. Este grupo consideraba las combinaciones posibles de ejes ternarios y de ejes cuaternarios.

Basándose en estas simetrías puntuales fundamentales, Sohncke procedió a construir lo que él llamó la simetría regular infinita de puntos, concluyendo que existían 66 grupos distintos.

Los estudios de Jordan y Sohncke sólo resolvieron parcialmente el problema. La solución completa se dio al final del siglo específicamente en 1890 y de manera simultánea e independiente por un matemático alemán, Arthur M. Schoenflies (1893-1928), y un mineralogista ruso, Evgraph Stepanovitch Fedorov (1853-1919). Unos años más tarde un amateur científico inglés, William Barlow (1845-1934), dedujo nuevamente y con independencia y basándose en unas premisas distintas de los otros dos el conjunto de los grupos espaciales. Estos tres autores demostraron, cada uno de ellos independientemente y utilizando una mecánica distinta, que existían 230 grupos espaciales distintos. Con este descubrimiento la teoría matemática de la estructura cristalina se había resuelto: la

importancia de estos trabajos requiere que se trate independientemente cada una de estas soluciones, pero antes de entrar en este detalle vale la pena tratar un punto que a pesar de que tenía aparentemente poca importancia fue trascendental para comprender mejor la simetría de los cristales.

LA SIMETRÍA ALTERNANTE DE PIERRE CURIE

Pierre Curie (1859-1906), que junto con su mujer había de ser conocido internacionalmente por su descubrimiento del radio, fue ante todo un cristalógrafo. Su contribución a este campo fue variada y notable, extendiéndose desde el crecimiento de cristales a problemas de simetría. Es en este asunto que nos interesa, en este momento, su trabajo.

Pierre Curie publicó en 1884 dos trabajos que habían de tener importancia en la teoría de la simetría de los cristales. El primero titulado *Sur les questions d'ordre: répétitions*¹⁰ parte de la premisa de que

el orden en un sistema puede presentarse de dos maneras distintas: es necesario considerar la repetición y la simetría¹¹.

Fue en este trabajo donde Curie introdujo el concepto de ejes doblados.

El segundo trabajo se tituló *Sur la symétrie*¹², donde abordó el problema que deriva de las relaciones de simetría en un sistema de coordenadas derecho e izquierdo y sus relaciones mutuas. Del estudio de estas relaciones Curie derivó la existencia de ciertos elementos nuevos de simetría, a saber, el plano y el eje de simetría alternante. También estudió la existencia de planos de deslizamiento que Curie indicó podía hallarse solamente en un espacio cristalino infinito.

¹⁰ Pierre Curie, *Sur les questions d'ordre: répétitions*, Bull. Soc. Min. France, 7 (1884), pp. 89-111.

¹¹ Pierre Curie, *Ibid.*, p. 89.

¹² Pierre Curie, *Sur la symétrie*, Bull. Soc. Min. France, 7 (1884), 418-457.

Curie comentó el trabajo de Bravais de la siguiente manera:

Bravais olvidó necesariamente un tipo de simetría, aquel que no tiene centro de simetría ni plano de simetría, pero que tiene un plano de simetría alternante ¹³.

Dedujo que los ejes de simetría alternantes podían ser sólo de orden cuatro o seis; a pesar de ellos el número total de clases no eran 36, como la generalización del concepto podía indicar, sino sólo 32, como Bravais había ya deducido. Curie comentó que

Entre estos 32 modos existen sólo uno que tiene un plano de simetría alternante no acompañado por un centro de simetría o por un plano de simetría... Los cristales que corresponden a este modo mostrarán un prisma cuadrático con cuatro facetas tetrahédricas derivadas de una modificación completamente oblicua. Estas 4 caras producirán por extensión un tetraedro cuadrático ¹⁴.

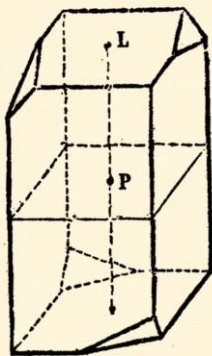


FIG. 47.- *El eje de inversión de Curie.*

¹³ Pierre Curie, *Ibid.*, p. 453.

¹⁴ Pierre Curie, *Ibid.*, p. 454.

LOS 230 GRUPOS ESPACIALES

Los elementos de simetría posibles en el cristal quedaron totalmente definidos gracias a la adición de Curie. Desgraciadamente, Curie se basó en el estudio morfológico y no profundizó en las implicaciones generales de lo que había descubierto. No obstante, sólo quedaba un paso para descubrir todas las combinaciones posibles de dichos elementos de simetría en los cristales y la respuesta final no se hizo esperar mucho. Esta respuesta fue dada, como ha sido ya indicada, en tres países, Rusia, Alemania y el Reino Unido por tres investigadores que trabajando coetáneamente y con completa independencia siguieron caminos también totalmente distintos. En realidad, el descubrimiento de estas combinaciones posibles de elementos de simetría en los cristales constituye uno de los capítulos más interesantes de la ciencia, pues demuestra cómo la verdad objetiva se descubre aun cuando se apliquen conceptos e ideas distintas. Cuando la solución es única no hay más remedio que se halle, independientemente del camino si éste es exacto.

El primero que dio la solución correcta fue Fedorov. Desgraciadamente, su trabajo fue publicado en ruso en las *Memorias de la Sociedad Mineralógica Rusa* en una serie de trabajos que aparecieron en 1885, 1880 y 1890, y que debido a la dificultad del idioma y la difícil accesibilidad, no fueron conocidos en el momento. Sólo cuando Schoenflies hubo publicado su estudio en 1891 fue cuando Fedorov se dio cuenta de que su trabajo no era conocido, y envió un resumen al *Zeitschrift für Krystallographie* en 1893¹⁵; con ello su prioridad quedaba demostrada. Aún habían de pasar muchos años hasta que la obra de Fedorov pudiera consultarse con ventaja. Hace sólo unos pocos años, concretamente en 1971, David Harker y su mujer Katherine traducían la obra al inglés por encargo de la American Crystallographic Association, y gracias a ello podemos

¹⁵ Fedorov, *Zeit. für Krystalogr.*, 21 (1893), 679.

consultar cómodamente una obra fundamental ¹⁶ que era prácticamente inaccesible.

La idea de Fedorov consiste en suponer el espacio cristalino lleno de forma compacta por cuerpos geométricos, los paraleloedros, que tienen igual forma y están asociados paralelamente. Es evidente que existen múltiples paraleloedros posibles, pero el propio Fedorov nos dice que:

En el estudio de las figuras se ve que para determinada red existen infinitos conjuntos de sistemas de paraleloedros; no obstante, aquí y en todos los demás casos, tendremos en cuenta solamente los paraleloedros normales, es decir, aquellos que por deformación y alargamiento pueden ser reducidos a los representantes más regulares.

El número de paraleloedros posibles es, por tanto, finito, y, en efecto, Fedorov indicó que sólo existen cinco básicos, el cubo, el rombododecaedro, el cuboctaedro, el prisma tetragonal con pirámide de orden opuesto y el prisma hexagonal. Estos paraleloedros fundamentales se pueden deformar morfológicamente para los distintos sistemas, llegando a la conclusión que existen 22 paraleloedros distintos que pueden llenar monótonamente el espacio.

Cuando estos paraleloedros se sustituyen por sus centros, el resultado del empaquetamiento no es otro que las 14 redes de Bravais, pues ciertos paraleloedros dan origen a la misma red.

Fedorov, por tanto, utilizó tres puntos de vista distintos y unidos hacia un fin común: el espacio cristalino puede dividirse en espacios locales, los paraleloedros, todos idénticos entre sí y paralelos; estos paraleloedros llenan el espacio y pueden ser sustituidos por un punto. Establecidas las redes con estos criterios, Fedorov pasa a estudiar lo que se puede hacer con cada paraleloedro. Para ello, idea que cada paraleloedro puede ser dividido en espacios menores que juntos constituyen el paraleloedro original. A estos nuevos cuerpos los denominó esteroedros, cuya orientación mutua es

¹⁶ E. S. Fedorov, *Symmetry of crystals*. Trad. de David y Katherine Harker. ACA Monograph, 7 (1971), X+315 pp.

E. S. Fedorov, *Symmetrie der Figuren regelmässiger Systeme*. Verh. Revs, K. Min. Gess. 2, 28 (1891), 1-145.

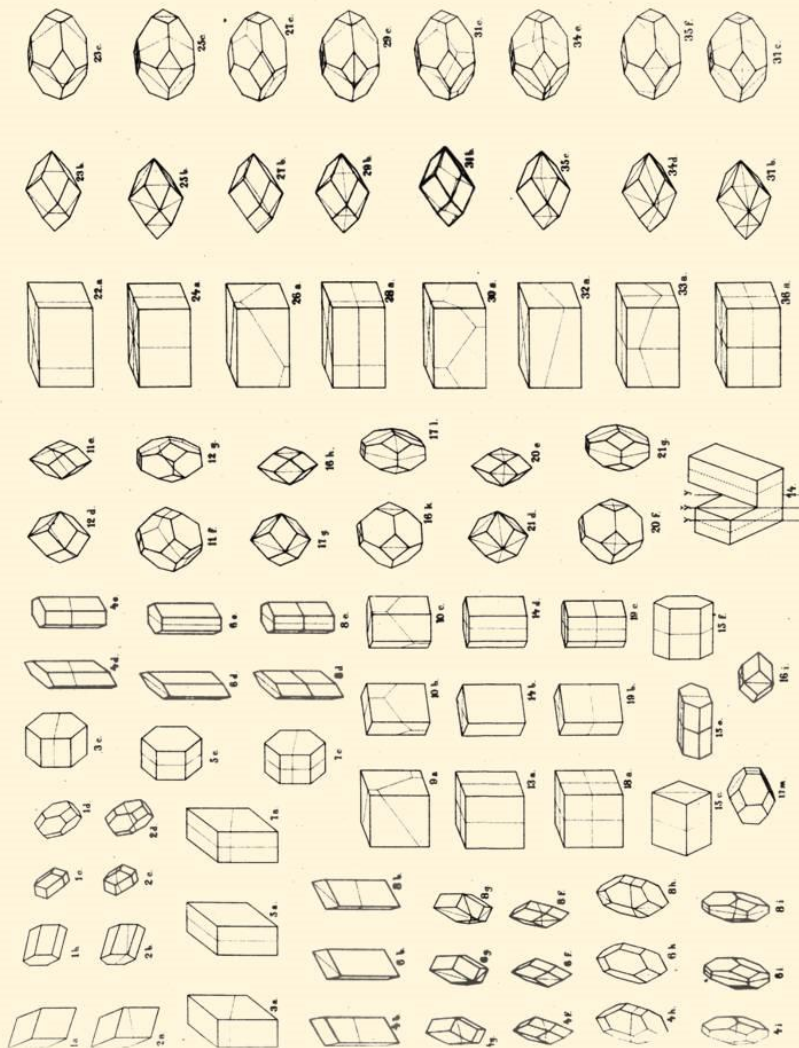


FIG 48.- *Paraleloedros de Fedorov.*

distinta dentro del paraleloedro original. Si ahora cada esteroedro se representa por su centro, es decir, por un punto, lo que se obtienen son los 65 sistemas de puntos que ya Sohncke había hallado. No obstante, Fedorov no se quedó ahí. En efecto, consideró no sólo los esteroedros, sino sus imágenes según planos de simetría, es decir, sus figuras enantiomorfas. Haciendo esto, y agrupándolas según «dobles sistemas» como él las denominó, llegó a la conclusión de que existían 230 posibilidades de combinar y asociar tales esteroedros, al tener en cuenta la posibilidad de que las unidades estructurales no fueran paralelas a sí mismas. Para ello distinguió tres tipos de sistemas: los sinmorfos, cuyas celdas tienen la misma simetría que el sistema cristalino del cual derivan; los sistemas hemisinmorfos, que forman los sistemas independientes, pero no son sinmorfos, y los sistemas asinmorfos, en los cuales las figuras adyacentes están diferentemente orientadas.

La solución alemana apareció en la obra *Kristallsysteme und Krystallstruktur*, que Schoenflies publicó en Leipzig en 1891. Como el alemán era a finales del siglo pasado la lengua científica, la obra se difundió rápidamente, y Schoenflies fue acreditado con el descubrimiento de los grupos espaciales. A pesar de que poco después se reconoció la obra de Fedorov, la obra de Schoenflies ha tenido mucho mayor peso en la marcha de la cristalografía que la de su colega ruso.

La idea rectora de Schoenflies fue bastante distinta. En primer lugar, partió del concepto de Wiener, según el cual cada molécula del conjunto cristalino debe tener las otras de tal manera relacionadas con ella que sean o idénticas o sus imágenes enantiomorfas, es decir, las producidas por reflexión en un plano. Establecido este criterio, Schoenflies se basa en lo que ya Jordan había demostrado, aplicando las imágenes de plano a los grupos que aquel autor había descrito. Finalmente, amplía los elementos de simetría de Sohncke con el plano de deslizamiento, además del plano de simetría alternante descubierto por Curie.

Por otra parte, la restricción cristalográfica hace que sólo se pudiera utilizar ejes binarios, ternarios, cuaternarios y senarios, que, como Sohncke había señalado, podrían ser helicoidales. Al tomar la imagen según un plano, estos ejes helicoidales podían ser derechos e

izquierdos. Con ello, Schoenflies no tenía más que aplicar ahora todas las combinaciones de estos elementos de simetría siempre que fueran compatibles, llegando al resultado de que existían 230 maneras de establecer grupos de simetría periódicos, es decir, el mismo resultado al que Fedorov había llegado poco antes.

La determinación de los 230 grupos espaciales, es decir, las simetrías que ligan entre sí las unidades estructurales de un cristal, era, pues, un hecho definitivo. No escapó a Schoenflies que dichos condicionantes simétricos delimitaban en el cristal unos espacios poliédricos que, por aplicación sucesiva de los elementos de simetría del grupo, llenaban el espacio cristalino. A estos espacios los denominó «dominios fundamentales», en cuyo interior se situaba la molécula o grupo atómico que forma la base material del cristal. La forma de estos dominios fundamentales era variada y, aunque eran siempre poliedros, Schoenflies no pudo, debido a que su formulación le daba forma indeterminada, encontrar una sistemática del tipo que Fedorov había hallado. Como Fedorov, se dio cuenta de que estos poliedros debían pertenecer a dos tipos ligados por un plano de simetría, pero no llegó a más. No obstante, su fama está asegurada, como en el caso de Fedorov, por haber descubierto el número exacto de las simetrías posibles de las estructuras de los cristales.

Al mismo tiempo que Fedorov y Schoenflies estaban deduciendo los 230 grupos espaciales, un amateur, William Barlow, estaba también interesado en el mismo problema.

La idea rectora de Barlow fue expuesta claramente en el principio de su trabajo, en el que decía que:

Desde los primeros tiempos de estudio cristalográfico se han llevado a cabo intentos para hallar alguna idea sobre la naturaleza de la última estructura de los cristales mediante métodos artificiales que imitan en lo posible los diferentes tipos de simetría que presentan estos cuerpos; estos intentos han consistido principalmente en empaquetados de esferas, elipsoides y otros cuerpos regulares de forma simétrica; los métodos

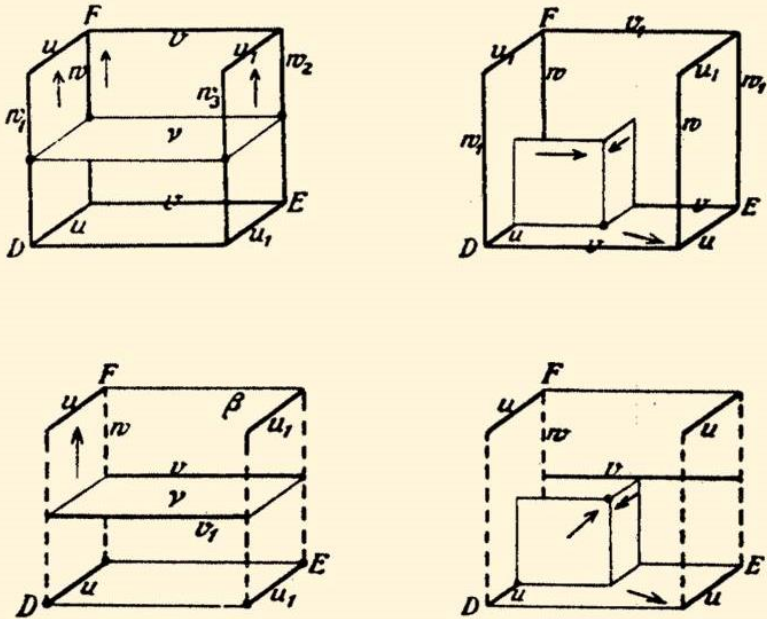


FIG. 49.- *Un grupo espacial de Schoenflies.*

empleados han sido en general que el empaquetado sea lo más denso posible y que los cuerpos empaquetados sean todos iguales ¹⁷.

No obstante, el avance de los conocimientos obligaba a idear empaquetados de figuras diferentes, y Barlow eligió la posibilidad de esferas de tamaños diferentes, que representarían los átomos. Como la esfera no es polar, la polaridad del cristal la dedujo como consecuencia de la disposición y no de la forma de las esferas de influencia. La influencia del sistema cristalino sería en el sentido de deformar dichas esferas en elipsoides, y en todo caso se debían conservar las relaciones de simetría del cristal.

La primera conclusión fue el descubrimiento de los dos tipos de empaquetado de bolas iguales, es decir, el cúbico y el hexagonal. Barlow, en su desarrollo, siguió las ideas de Wiener y Sohncke, liberándose del postulado de tener que dividir el espacio cristalino en celdas elementales. En su deducción, nuestro autor jugaba con las distancias entre las bolas que las hacía variar lentamente, deduciendo las formas que resultan del empaquetado de bolas iguales.

Barlow continúa su estudio tratando el caso de bolas de dos tipos, primero en un plano y luego en el espacio, descubriendo la estructura tipo sal común, y habla de los intersticios entre bolas grandes. Barlow analiza seguidamente agrupaciones de bolas en número distinto.

Este análisis de estas agrupaciones le llevó a considerar que en realidad se trataba de hallar conjuntos de puntos relacionados por simetría, distinguiendo las formas enantiomorfas y las equivalentes por plano, que Sohncke no había examinado. De esta manera, Barlow halló que existían 165 tipos de estructuras homogéneas además de los 65 sistemas de puntos de Sohncke, con lo que llegó al número mágico de los 230 grupos. Con ello, y con sus estructuras empaquetadas, Barlow se aseguraba también un puesto de honor en la historia de la cristalografía.

¹⁷ William Barlow, *A Mechanical cause of homogeneity of structure and symmetry geometrically investigated; with special application to crystals and to chemical combination*. Scient. Proc. Royal Rublin Soc., 8 (1897), pp. 527-690.

PROBABLE NATURE OF THE INTERNAL SYMMETRY OF CRYSTALS

SOME studies pursued by the writer as to the nature of molecules have led him to believe that in the atom groupings which modern chemistry reveals to us the several atoms occupy distinct portions of space and do not lose their individuality. The object of the present paper is to show how far this conclusion is in harmony with, and indeed to some extent explains, the symmetrical forms of crystals, and the argument may therefore in some sort be considered an extension of the argument for a condition of internal symmetry derived from the phenomena of cleavage.

If we are to suppose that crystals are built up of minute masses of different elements symmetrically disposed, it is natural to inquire in the first place what very symmetrical arrangements of points or particles in space are possible. It would appear that there are but *five*, which will now be described.

If a number of equal cubes are built into a continuous mass (Fig. 1), a system of points occupying the centres and angles of these cubes will furnish an example of one of these symmetrical arrangements. In this system each point is equivalent from the right nearest point, and if a number of equal-sized spheres be stacked on a base layer arranged so that the sphere centres when joined form a system of equal squares, a side of which equals to the diameter of the spheres the ratio $2 : 1 \sqrt{2}$ (see

of the fourth and second) and then the seventh, as that the fifth, sixth, and seventh layers are also in the second kind of symmetry, and so on. The symmetry produced is, like the last, hexagonal in structure and kind.

The writer believes that every one of the various symmetrical forms presented by crystals can be shown to be commensurate with the substance of an arrangement of the atoms of the crystallizing compound in one or other of these five kinds of symmetry at its



FIG. 1.



FIG. 2.



FIG. 3.



FIG. 4.



FIG. 5.

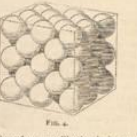


FIG. 6.



FIG. 7.

line when crystallization begins; and proposes to show that a relation subsists between the atomic composition of very many bodies and their crystal forms in harmony with this conclusion. To proceed then to facts, we notice first that, as a rule, one points consisting of an equal number of atoms of two kinds crystallize in cubes.

The following may be mentioned—
Potassic chloride, KCl.
Potassic bromide, KBr (sometimes elongated into prisms, or extended into plates).

Dec. 20, 1883]

NATURE

187

Potassic iodide, KI,
Sodic chloride, NaCl,
Sodic bromide, NaBr,
Sodic iodide, NaI (polyhedral above 40° C.).
Cust. chloride, Cs₂Cl,
Fluomelic sulphide, PbS,
Argentite chloride, AgCl.
When we have named cubic chlorides, crystallizing above 15°

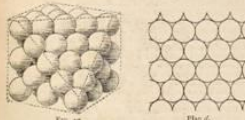


FIG. 1.



FIG. 2.



FIG. 3.



FIG. 4.



FIG. 5.



FIG. 6.

in octahedra, we have mentioned most of the compounds consisting of two elements in equal proportions known to us as a crystalline state.

Mercuric sulphide, Hg₂S, which crystallizes in six-sided prisms, is an apparent exception, but if we were guided by the known volume of mercury in determining its atomic weight, we should have to write the compound Hg₂S₂.

Other apparent exceptions are—

Zincic oxide, ZnO, crystallizing in six-sided prisms.

Cadmian sulphide, CdS, and

Chalcid, Ge, crystallizing in minute six-sided prismatic crystals.

Now three out of our five possible kinds of internal symmetry have three axes or directions at right angles to each other, in reference to which they are disposed in the same symmetrical manner, and two kinds, the first and second, admit of a very symmetrical arrangement of two kinds of particles in equal numbers (see Figs. 2 and 3). Surely this coincidence is very significant, and it has suggested the probability that when a compound consists of two kinds of chemical atoms in equal numbers, these atoms are symmetrically disposed according to either the first or the second kind of internal symmetry.

We observe next that the third and fourth kinds of symmetry (Figs. 4 and 5) readily lend themselves to the symmetrical arrangement of particles of two kinds present in the proportion 2 : 1. For, as already pointed out, these two kinds of symmetry may either of them be produced by piling up layers of spheres placed irregularly in contact (see Figs. 2 and 3) and spheres of two colours present in the proportion of 2 : 1 can be arranged in a most symmetrical manner in layers of this kind (see Fig. 6).

As to what variation of position of black-and-white layers of this kind with respect to one another are possible, consistent with great symmetry, we have concluded that, apart from the question of arrangement of colours, there are but two, viz. the third and fourth kinds of symmetry (Figs. 4 and 5); but taking colour into account a greater variety is possible. Thus a little consideration shows us that, while all the possible ways of depositing the second layer produce a perfectly identical result, a choice of six different equally symmetrical results is produced in depositing the third layer, in all of which the spheres of the less numerous colour form lines of spheres in contact running through the layers, and of which three belong to the third kind of symmetry and three to the fourth.

To specify these: We may have the less numerous spheres of the third layer placed with respect to those in the second and first—

(1) So that the three spheres of each of the first two layers situated to range in line, the lines joining their centres forming a series of parallel straight lines crossing the planes of the layers obliquely. This arrangement belongs to the third kind of symmetry.

(2 and 3) So that the centres of these three spheres, when joined, form a slightly obtuse angle; a different result being produced as the angle is made to the right or to the left. This pair of arrangements belongs also to the third kind of symmetry.

(4) So that the less numerous spheres in the third layer are vertically over those in the first. This arrangement belongs to the fourth kind of symmetry.

(5 and 6) So that, as in (2) and (3), the sets of spheres form a system of equal obtuse angles, but the angles now being very obtuse. There are here, as in (2) and (3), a right-handed and a left-handed arrangement. These belong to the fourth kind of symmetry.

The deposition of the third layer, by the unities of symmetry, determines the deposition of succeeding layers, and it follows therefore from the above that six different equally symmetrical arrangements of spheres of two colours present in the proportion 2 : 1 are possible in the third and fourth kinds of symmetry.

As to (1) the parallel lines of the less numerous spheres crossing the first three layers will extend through subsequent layers.

As to (2) and (3) every three continuous layers will display the less numerous sphere centres placed to form the same angles as are presented by the triads in the first three layers, and consequently these sphere centres lie on spirals which are right-handed or left-handed as the case may be; the less numerous spheres in the fourth layer being vertically over those in the first, those in the fifth over those in the second, and so on.

As to (4) the less numerous spheres in the fourth layer are vertically over those in the second, those in the fifth over those in the third, and so on; and thus the lines of spheres in contact running through successive layers form a series of similar zigzags.

As to (5) and (6) the sphere centres, as in (2) and (3), lie either on right-handed or on left-handed spirals; in this case the less numerous spheres in the seventh layer being vertically

FIG. 50 (modificada).- Los empaquetados de Barlow.

EL PRINCIPIO DE LA NUEVA ERA

La ciencia de los cristales estaba completa, al menos en su aspecto formal. Se habían descubierto las simetrías posibles de los cristales, se habían descifrado las bases formales de sus propiedades físicas. Pero, a pesar de todo, no se sabía cómo relacionar todo lo que se conocía con la estructura de los cristales. El formidable edificio de conocimientos que constituye lo que hoy llamamos cristalografía clásica tenía pies de barro; puesto que se carecía de la técnica que hiciera posible el estudio de la estructura atómica de los cristales. De poco servía saber que el cuarzo era piezoeléctrico si no se sabía cómo la distribución de los átomos explicaba dicho efecto. Y la tragedia era que la ciencia de los cristales no poseía ningún método que permitiera avanzar; se tenía un magnífico edificio que hacía falta amueblar.

Y la solución vino súbitamente.

Alrededor de 1912 existía en Múnich un grupo excepcional de científicos. Allí se encontraba el profesor Wilhelm Konrad Röntgen (1845-1923), que en 1895 siendo jefe del Departamento de Física de la Universidad de Wurzburg había descubierto una nueva radiación que humildemente bautizó como rayos X, descubrimiento que valió el primer premio Nobel dado a la disciplina de Físicas. Como sucesor de Boltzmann (1844-1906), Röntgen había llevado a Múnich a Arnold Johannes Wilhelm Sommerfeld (1868-1951) un físico que pronto creó un grupo interesado en el estudio de los rayos X.

Dicho grupo de físicos estaba por aquellas fechas trabajando activamente en el estudio experimental de la naturaleza y de las propiedades de dichos rayos. Así, van Angerer medía la energía de dicha radiación; un compañero suyo, Bassler, su polarización y Friedrich la distribución acimutal de su intensidad.

De no menor importancia era la presencia en Múnich del decano de los cristalógrafos, Paul von Groth, cuyas ideas sobre la constitución molecular de los cristales era bien conocida.

A este ambiente de trabajo y de interés se incorporó en el otoño de 1909 un joven matemático Max Theodor Felix von Laue (1879-1960), ayudante de Planck en la Universidad de Berlín. Cuando Laue llegó a Múnich todavía existían numerosas dudas acerca de la

naturaleza de los rayos X, pues mientras unos los consideraban partículas, otros los creían radiaciones e incluso en esto no estaban de acuerdo, pues mientras el propio Röntgen los creía radiaciones longitudinales como el sonido, Charles Glover Barkla (1877-1944) un físico inglés que trabajaba en la Universidad de Londres, parecía haber demostrado que eran ondas transversales y que los rayos X podían ser difractados por gases. No obstante, hasta que se pudiera medir la longitud de onda de dichos rayos no se podía cerrar el caso.

Se sabía que la longitud de onda se podía medir mediante la difracción producida por una reja cuyas marcas estaban talladas a una distancia dada. El hecho era bien conocido en física y se aplicaba al estudio de la difracción de la luz. Pero el problema era que al parecer la longitud de onda de los rayos X era mucho menor que la propia de la luz ordinaria, y, por tanto, la reja de difracción debía ser tan fina que, técnicamente, era imposible de conseguirla. Y aquí es donde surgió la gran intuición de Laue.

Todo comenzó con la tesis doctoral de Paul P. Ewald, en la que su autor había intentado dar cuenta de las propiedades ópticas de los cristales como el resultado de la interacción de ondas electromagnéticas con los dipolos atómicos. Pocos días antes de su lectura en febrero de 1912, Ewald tuvo a bien enseñarla a Laue, a quien le explicó que basaba su tesis en el supuesto que los resonadores atómicos se hallaban situados en los nudos de las redes que Bravais había considerado más de medio siglo antes. A Laue le interesó mucho el problema y preguntó a Ewald cuál debía ser la distancia real entre dichos resonadores en el cristal y qué pasaría si una radiación con una longitud de onda mucho más corta que la luz ordinaria pasara a través del cristal. Ewald le señaló que una de sus ecuaciones era válida para dicho caso. Laue, que había estado preparando un artículo sobre difracción para una enciclopedia de Física, pensó que si la longitud de onda de los rayos X fuera del mismo orden de magnitud que la separación de los átomos en los cristales, entonces se debía obtener una especie de difracción al pasar dicho rayo por un cristal.

El asunto se discutió en uno de los seminarios que regularmente mantenía el grupo de Sommerfeld. Parecía que la difracción era posible, pero también parecía que el movimiento atómico producido

por la temperatura rompería la regularidad de tal periodicidad en el cristal y que no se podrían observar máximos claros de difracción. No obstante, se llegó a la conclusión que, siguiendo la frase de Röntgen que más vale trabajar que pensar, era más práctico hacer el experimento y ver qué pasaba. El entusiasmo y la claridad de ideas del joven Laue afectó profundamente a la audiencia, de tal manera que W. Friedrich, un ayudante de Sommerfeld, y un doctorando, Paul Knipping, se ofrecieron a llevar a cabo el experimento.

El aparato que idearon Friedrich y Knipping era muy rudimentario. El tubo de rayos X lo prestó Röntgen y con un viejo goniómetro montaron una cámara cubierta de plomo en la que la radiación entraba a través de un colimador fino, de 1 mm de sección. El cristal lo proporcionó Groth. A diferentes distancias y direcciones se colocaron sendas placas fotográficas en las que se esperaba registrar el efecto.

En un día del mes de mayo, Laue se retiraba ya a su casa. Por la ventana del laboratorio, Friedrich vio su salida y asomándose le llamó enseñándole una placa. Laue volvió y las huellas dactilares dejadas en la placa demuestran el alborozo del momento; en efecto, junto al haz primario aparecía una serie de manchas que no eran otra cosa que máximos de difracción.

La prueba experimental de la difracción de los rayos X por los cristales existía. La puerta se había abierto, y un campo ilimitado de posibilidades se abría a una ciencia que con dicho experimento se había súbitamente rejuvenecido. Pero esto constituye material para otra obra.

ÍNDICE DE AUTORES

- Abolays, 35
Acosta, J. de, 84
Aepinus, 171, 172, 173, 175
Agrícola, 19, 47, 48, 50, 51, 52, 54, 55, 57, 85, 178
Alembert, d', 192
Alejandro Magno, 21
Alleon-Dulac, Jean-Louis, 143, 144
Alfonso el Sabio, 32, 33, 35, 49
Alonso Barba, A., 48
Altemstein, 247
Amorós, 32, 48, 175, 182, 247
Anaximandro, 14
Angerer, von, 393
Anglicus, 37
Angstrom, A. J., 340, 341
Arago, F., 286, 288, 289, 301, 302, 303, 304
Aristóteles, 17, 18, 20, 21, 22, 24, 25, 36, 37, 38
Arzruni, A, 242, 243, 244
- Badulard, G., 308
Bacon, R., 41
Baily, 177
Barkla, C. G., 394
Barlow, W., 94, 209, 382, 389, 391, 392
Bartholinus, Erasmo, 70, 113, 114, 115, 116, 117, 118, 119, 120, 125, 137, 144, 211, 215, 219, 238
Bartholin, Thomas, 72, 113
Bassler, 393
- Bauer, G. (Ver Agrícola.), 48, 49
Baumé, A., 177
Bell, 121
Bentley, 57
Bergman, T., 120, 174, 210, 212, 213, 214, 215, 216, 217, 218, 219, 224
Bermann, Lorentz, 50
Bernhardi, 245, 263, 264, 266, 274
Bernoulli, Daniel, 317
Bernouilli, John, 171, 258
Berzelius, 213, 247, 248, 249
Beudant, F. Sulpice, 245, 246, 252, 253
Bezold, 275
Biot, Jean Baptist, 243, 287, 289, 290, 291, 296, 303, 313, 314, 315, 316, 324, 351, 370, 371
Biringuccio, Vanoccio, 48, 49
Blasius, G., 72
Boltzmann, 393
Bošcovich, 89, 91, 190, 191, 192, 193, 194, 195, 196, 208, 352
Born, M., 193
Bournon, 294, 296
Boyle, Robert, 80, 81, 82, 83, 84, 105, 106, 107, 178, 188, 189
Bravais, A., 39, 233, 275, 280, 281, 282, 283, 326, 336, 350, 353, 354, 355, 356, 357, 359, 360, 361, 362, 363, 364, 365, 366, 367, 377, 378, 379, 380, 384, 386, 394
Breithaupt, 274

- Breton, P., 353, 354
Brewster, D., 136, 189, 274, 290, 291, 292, 293, 294, 296, 297
Brooke, 274
Bromell, Magnus von, 166
Bruno, Giordano, 89, 91
Buch, Leopold von, 259
Buffon, Conde de, 158, 177, 241
Burmester, 45

Canton, John, 175, 177
Cappeller, Maurice, 156, 157, 160, 178, 217
Carangeot Arnould, 180, 181, 203, 274
Catalina de Médicis, 55
Cavendish, H., 313
Celsius, Olaf, 165
Colbert, 121
Collison, P., 173
Copérnico, 9
Cromwell, 105
Cutler, J., 66
Curie, P., 237, 282, 383, 384, 385, 388
Cuvier, Barón de, 220, 223

Charleton, W., 105, 188, 214
Chaskolskaia, 160
Chwolson, 325

Dalton, J., 196, 197, 198, 199, 200, 203
Daniell, J. F., 342
Daubenton, 219, 220
Daumas, 180
Dávila, F., 175, 176, 178
Davidson, W., 63
Davy, 195
Defrance, 220
Dejussie, Laurent-Pierre, 244

Delafosse, G., 336, 348, 349, 351, 366
Demócrito, 16
Des Cloizeaux, A., 271
Desagulier, Jean Theophile, 172
Descartes, R., 96, 97, 98, 99, 100, 101, 105, 117, 118, 121, 125, 126, 147
Diógenes Laercio, 22, 101
Dioscórides, 26, 27, 30
Duhamel, Jean-Baptiste, 81
Duhamel, Jean-Marie, 318, 319, 320, 321, 324, 325
Dulong, P. L., 332, 334
Durero, A., 43, 44, 45, 46, 47, 78

Einstein, 8, 140
Epicuro, 17, 101, 102, 105, 187
Epifanio, 31
Euclides, 38
Euler, Leonhard, 171, 258, 259, 261
Ewald, P. P., 394

Faraday, 195
Fay, Charles-François du, 173
Fedorov, E. S., 382, 385, 386, 387, 388, 389
Fermat, Pierre de, 121, 257
Fernando II de Médicis, 72, 74
Filipo de Macedonia, 21
Fizeau, A., 342, 343
Fletcher, L., 344, 345
Forster, 271
Fourier, J., 315, 316, 317, 318
Frankenheim, M. L., 351, 352, 353, 354
Fresnel, Augustin Jean, 119, 126, 130, 239, 301, 302, 303, 304, 305, 306, 307, 308, 337, 347, 348
Friedrich, W. 393, 395

- Gahn, Johan Gottlieb, 215, 217
 Galileo, 9, 47, 63, 64, 65, 72, 95, 96, 311
 Gassendi, P., 58, 59, 63, 101, 102, 103, 104, 105, 118, 121, 152, 214, 311
 Gauss, C. F., 350, 362
 Gay-Lussac, 249, 252, 266, 287
 Gehler, J. K., 167, 275
 Gilbert, William, 59, 60, 61, 62, 63, 89, 105, 188
 Goodman, 65
 Graaf, Rumer de, 150
 Grailich, W. J., 341, 344
 Grosseteste, R., 41
 Groth, P., 344, 393, 395
 Guglielmini, D., 145, 146, 154, 156, 157, 160, 178
 Gustav, 274
 Haidinger, 274
 Harker, D., 385
 Haüy, R. J., 10, 59, 103, 120, 146, 154, 177, 184, 185, 203, 208, 212, 218, 219, 220, 221, 222, 223, 224, 225, 226, 227, 228, 229, 230, 231, 232, 233, 234, 235, 236, 237, 238, 239, 240, 241, 242, 244, 245, 247, 248, 249, 250, 252, 257, 259, 260, 261, 265, 266, 267, 269, 271, 272, 274, 287, 291, 294, 296, 303, 316, 333, 335, 336, 347, 348, 349, 351, 359, 364, 374
 Henkel, 245
 Heráclito, 16, 17
 Herschel, L. J., 341, 370
 Hessel, Johan F. C., 274, 275, 276, 277, 278, 280, 354
 Heuland, H., 271
 Hire, Philippe de la, 147, 148, 149, 154, 178, 214, 257
 Hoch, Franz Ulbrick Theodor (Ver Aepinus.)
 Holbach, d', 163
 Hooke, R., 65, 66, 67, 68, 69, 70, 71, 81, 107, 108, 109, 110, 111, 135, 143, 144, 189, 197, 205, 311
 Hooykaas, 224
 Huygens, Christian, 70, 71, 73, 81, 118, 120, 121, 122, 123, 124, 125, 126, 127, 128, 130, 131, 132, 133, 134, 135, 136, 137, 139, 140, 143, 144, 148, 149, 178, 287, 289, 290, 296, 297, 299, 300, 301, 306, 311
 Humphreys, 57
 Isabel de Inglaterra, 59, 105
 Ingenhous, J., 321
 Jannettaz, E., 326, 329
 Jordan, C., 377, 378, 379, 382, 388
 Jungius, J., 58, 96
 Kahler, M., 154
 Kapp, J. E., 167
 Karsten, D., 259
 Kelvin, Lord, 195
 Kepler, J., 57, 63, 70, 91, 92, 93, 94, 95, 125, 200, 206
 Kestner, 373, 374
 Klapproth, 242, 247, 259
 Knipping, P., 395
 Kupffer, 269, 274
 Lagrange, J. L., 192, 287, 315, 318
 Lambert, J. H., 311
 Lamé, G., 274, 320, 325, 326
 Lang, V. von, 178, 341, 344
 Laplace, P. S., 287, 303, 313, 315
 Lavoisier, A. L., 312, 313
 Laue, Max von, 299, 393, 394, 395
 Leblanc, N., 245

La gran aventura del cristal

- Lechman, 172
Leeuwenhoek, A. von, 71, 149, 150, 151, 152, 153, 154, 212
Legendre, A. M., 315
Lejeune-Dirichlet, P. G., 362
Lemery, N., 172
Leonhard, 258, 275
Leonardo de Vinci, 46, 47, 64, 72
Lermina, C., 180
Leucipo, 16
Lévy, Armand, 271, 272
Linnaeus, C., 164, 165, 166, 167, 169, 170, 171, 178, 183, 212
Lomonosov, M. V., 159, 160, 161, 162, 189, 190
Lucrecio, 16, 17, 88
Luis XIV, 121

Magnus, Olaus, 57, 70
Mairan, J. D., 154, 155, 217
Malpighi, M., 145
Malus, 130, 138, 239, 274, 285, 286, 287, 288, 289, 290, 291, 301, 316, 351
Merimer, L., 302
Mersenne, 101, 105, 121
Mieleitner, 146
Miller, W. H., 270, 272, 273, 274
Mitscherlich, E., 205, 244, 247, 248, 249, 250, 251, 252, 253, 254, 255, 333, 334, 335, 336, 341, 342, 370
Moebius, A. F., 268
Mohs, F., 267, 274
Montanaro, G., 145
Morveau, M., 214
Musschembroek, P. von, 173

Napoleón, 285, 302, 315
Naumann, Karl Friedrich, 270
Neckam, 40
Nerón, 28

Neumann, C. G., 341
Neumann, F. E., 268, 337, 338, 339, 340
Newton, I., 8, 40, 66, 71, 118, 122, 134, 135, 136, 137, 138, 139, 140, 141, 142, 143, 178, 189, 190, 233, 286, 287, 289, 298, 299, 303, 311, 343
Nörrenberg, J. G., 341

Oldenburg, H., 80
Oresmes, 38, 39, 40, 92
Palissy, B., 47, 48, 54, 55, 56, 57, 60, 102
Paracelso, 144
Partington, 96
Pascal, 121
Pasteur, L., 9, 290, 369, 370, 371, 372, 373, 374, 375
Pérez de Vargas, B., 52, 53
Petit, A. T., 178, 332
Petrus Peregrinus, 40
Pfaff, 342
Pierre de Maricourt (Ver Petrus Peregrinus.), 40
Pitágoras, 14, 15
Planck, M., 393
Platón, 13, 15, 16, 21, 23, 63
Plinio el Viejo, 27, 28, 29, 30, 31
Poisson, Simeon Denis, 318, 319
Priestley, J., 195
Ptolomeo, 32

Robien, P. C. de, 163, 178
Rochot, 101
Roemer, O. C. (Rømer, O. C.) 125
Romé de l'Isle, J. B., 175, 176, 177, 180, 181, 182, 183, 184, 185, 212, 214, 220, 240
Röntgen, W. K., 393, 394, 395

Índice de autores

- Rose, C., 264, 270
Rudbeck, O., 164
Rumford, B. T., 288, 301, 313
- San Alberto Magno, 35, 36
San Basilio, 31
San Isidoro, 30
San Juan Crisóstomo, 74
Santo Tomás de Aquino, 35
Schelling, 259, 260
Scherz, G. F. K. ed., 75, 78
Schoenflies, A. M., 382, 385, 388, 389, 390
Schufle, J. A. 213
Seebeck, A., 291
Seeber, L. A., 335, 336, 348, 350, 351, 362
Senarmont, H. R., 321, 322, 323, 324, 325, 341
Sennert, D., 96
Smebach, 180
Socquet, 312
Sócrates, 21
Soleil, 343
Solinus, 30
Sohncke, L., 275, 379, 380, 381, 382, 388, 391
Sommerfeld, A. J., 393, 394, 395
Stahl, 158, 178
Stensen, N., 13, 71, 72, 74, 75, 76, 77, 78, 79, 80, 81, 82, 83, 84, 113, 115, 143, 144, 145, 146, 148, 156, 157, 182, 189, 267
Stromeyer, 244
Swedenborg, E., 190, 191
- Tales de Mileto, 14
Teofrasto, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 37
Thenard, 243
Thomas de Cantimpré, 37
- Thomson, B., 294, 313
Tito, 27
Torricelli, 65, 72, 104
- Ulloa, 203
- Valentinus, B. 245
Vauquelin, 245
Vicent de Bauvais, 37
Vincard, N., 180
Viviani, V., 72
- Wallerius, 178, 212, 213
Weiss, C. S., 257, 259, 260, 261, 262, 263, 264, 265, 266, 267, 269, 270, 273, 274, 336, 337, 339, 340, 351
Werner, A. G., 51, 167, 168, 169, 170, 171, 183, 242, 259
Whewell, W., 272
Wiener, C., 379, 388, 391
Willebord, 117
Wilson, B., 173, 175
Wollaston, W. H., 203, 204, 205, 206, 208, 209, 267, 274, 291, 299, 300, 301, 333, 351
- Young, T., 239, 288, 297, 298, 299, 301, 313

ÍNDICE

Introducción	7
1. El período precristalino	13
Cuando el cristal no existía, 13.-Las ideas básicas, 14.-Al principio eran piedras, 20.-Dioscórides, 26.-Plinio el Viejo, 27.-Los Lapidarios, 31.-El problema de llenar espacio: Origen de la restricción cristalográfica, 38.-La piedra imán, 40.	
2. El descubrimiento de la forma cristalina	43
La belleza del cristal y los artistas, 43.-Cambió el enfoque científico, 46.-Los hombres de ciencia, 47.-Agrícola y la morfología de los minerales, 50.- Bernardo Pérez de Vargas y su «De Re Metálica», 52.-Palissy y sus Discursos Admirables, 54.-La constancia de la forma cristalina se convierte en conocimiento aceptado, 57.-Las «terrelas» de Gilbert, 59.-El legado de Platón, 63.-Una nueva técnica: el microscopio, 63.-Robert Hooke y el microscopio, 65.-Dendritas, 68.-Cristales de nieve, 70.-Stensen y la ley de constancia de los ángulos, 71.-Ideas de Stensen sobre los cristales, 75.-Boyle y el crecimiento de los cristales, 80.	
3. Del atomismo al empaquetado de bolas	85
El abandono del aristotelismo, 87.-El atomismo redescubierto, 90.-La invención del empaquetado de bolas: Kepler, 93.-Gassendi y el atomismo epicúreo, 103.-El atomismo en Inglaterra: Charleton y Boyle, 107.-El segundo descubrimiento del empaquetado de bolas, 109.- El primer programa para el estudio de los cristales, 112.	

4. Las propiedades físicas de los cristales son diferentes 113

Erasmus Bartholino y la doble refracción, 115.-Huygens y la interpretación de la doble refracción, 122.-La luz como ondas, 127.- Interpretación de la doble refracción, 128.-Newton sobre la doble refracción, 136.-Índice de refracción y densidad, 143.

5. Nacimiento de la cristalografía 143

Yatroquímica, 145.-Philippe de la Hire, 149.-Cristales a espuestas: Leeuwemhoek y su microscopio, 151.-La ciencia de los cristales toma un nombre propio, 158.-Otra vez el empaquetado de esferas, 161.- Mineralogistas y Gabinetes Mineralógicos, 164.-Linnaeus y la morfología cristalina, 166.-Werner y los caracteres externos de los minerales, 169.-El extraño comportamiento de la turmalina, 173.-La cristalografía se hace ciencia: Romé de l'Isle, 177.-La cristalografía como ciencia, 179.-Leyes o principios de la cristalografía, 181.-El método de las truncaduras, 185.-Otras ideas de Romé de l'Isle, 186.

6. Teoría de Cohesión 187

Boscovich, 193.-La teoría de Boscovich, 194.-Distribución geométrica de los átomos en los cristales, 198.- Empaquetado de átomos en los cristales, 199.-Wollaston y la estructura atómica de los cristales, 205.

7. Los cristaloclastas 211

Crecimiento cristalino y exfoliación de la calcita: Bergman, 213.- Una vez más la exfoliación de la calcita: René Just Haüy, 221.-La teoría de los cristales, 227.-La teoría de los decrecimientos y de la ley de las intersecciones racionales, 229.-Moléculas sustractivas, 234.- Homogeneidad cristalina, 235.-La ley de simetría, 236.-El caso de la turmalina, 238.-Crecimiento de cristales y otras cuestiones, 239.-Fórmulas representativas de los cristales, 241.

8. La gran controversia 241

¿Estaba Haüy equivocado?, 243.-El problema del aragonito, 244.- El caso de los cristales mixtos: Isomorfismo, 247.- Mitscherlich,

Índice

Berzelius y Häuy: Las dos caras de una moneda, 249.-Los descubrimientos de Mitscherlich: Polimorfismo e isomorfismo, 252.

9. La geometrización del cristal 257

Las lecciones de la geometría analítica, 259.-El origen de la cristalografía germana, 261.-El sistema de los ejes cristalinos: Los sistemas de cristalización, 263.-La ley de las intersecciones racionales y los parámetros de una cara, 267.-La ley de zonas, 269.-La notación paramétrica, 271.-La notación de Lévy, 273.-Los índices de Miller, 274.-Las clases cristalinas: Hessel, 276.-La labor de Bravais, 282.

10. Entendiendo la óptica de los cristales 285

Todo empezó con el espato de Islandia y una superficie reflectora, 288.-Polarización rotatoria, 291.-El sistema de los anillos coloreados: Cristales positivos y negativos, 292.-A pesar de todo, Huygens estaba en lo cierto, 299.-La segunda medalla de Rumford casi no llega a tiempo, 303.-La óptica de los cristales según Fresnel, 306.-La física de los cristales, 310.

11. Del calórico a los elipsoides térmicos 311

Dos ideas opuestas, 313.-Continuidad y ecuaciones diferenciales parciales, 315.-Fourier y sus series, 317.-La intuición de Poisson, 319.-La anisotropía de los cristales: Duhamel, 320.- La evidencia experimental, 323.-La teoría ya lo había dicho, 326.-Aspecto estructural, 328.

12. Expansión térmica 331

Expansión térmica de los sólidos, 333.-Anisotropía de la dilatación térmica, 335.-La idea de Seeber, 337.-El principio de Neumann, 338.-Desarrollo de la teoría, 342.-Mejoras experimentales, 344.-El método interferométrico de Fizeau, 344.-La síntesis final: Fletcher, 346.

13. Los cristales como redes 347

La idea, 349.-La contribución de los matemáticos, 351.-El error de

La gran aventura del cristal

Frankenheim, 343.-Haces de elementos de simetría, 355.-Las 14 redes de Bravais, 356.-Redes Polares, 361.-Los cuerpos de Dirichlet, 362.-La teoría de los cristales de Bravais, 365.

14. De los cristales al mecanismo de la vida 369

Pasteur y el descubrimiento de la disimetría, 371.-La disimetría molecular, 375.

15. De redes a grupos espaciales 377

La representación analítica de los grupos: Jordán, 379.-El desarrollo de Sohncke, 381.-La simetría alternante de Pierre Curie, 385.-Los 230 grupos espaciales, 387.-El principio de la nueva era, 394.

ISBN: 84-7491-000-5
Depósito legal: M. 36.868-1978

Imprime Hijos de E. Minuesa, S. L.
Ronda de Toledo, 24 – Madrid-5

BIBLIOGRAFÍA

Aepinus, Franz Ulrich Theodor, 1724-1802. Mémoire concernant quelques nouvelles expériences électriques remarquables. *Mémoires de l'Académie royale des sciences et belles-lettres*, **1756**, 12, 105-121.

Agricola, Georg, 1494-1555. *De natura fossilium* (Textbook of mineralogy). Traducido de la 1ª edición en latín de 1546 por Mark Chance Bandy y Jean A. Bandy para la Mineralogical Society of America (MSA). New York: Geological Society of America. **1955**. 240 p. XIII, fasc. 25 cm.

Agricola, Georg, 1494-1555. *De re metallica*. Parisiis: Apud Hieronymum Gormontiu[m]. **1541**. 108, [4] p. (las 2 últimas hojas en blanco), 17 cm. (8vo).

Agricola, Georg, 1494-1555. *De re metallica*. Traducido de la 1ª edición en latín de 1556, con introducción bibliográfica, anotaciones y apéndices sobre el desarrollo de métodos de minería, procesos metalúrgicos, geología, mineralogía y leyes mineras desde la antigüedad hasta el siglo XVI por Herbert Clark Hoover y Lou Henry Hoover. New York: Dover Publications. **1950**. XXXI, 638 p. 28 cm.

Alberto Magno, Santo, 1206-1280. *De mineralibus*. English Book of minerals. Traducido del latín por Dorothy

Wyckoff. Oxford: Clarendon P. **1967**. XLII, 309 p., 2 lám., (incl. fasc.), 26 cm.

Alleon Dulac, Jean Louis, 1723-1768. *Mélanges d'histoire naturelle*. Lyon: Chez Benoît Duplain. **1765**. 6 vol. 18 cm.

Amorós, José Luis, 1920-2001. Notas sobre la historia de la cristalografía. I. La controversia Haüy-Mitscherlich. *Boletín de la Real Sociedad Española de Historia Natural. Sección geológica*, **1959**, 57, 5-30.

Amorós, José Luis, 1920-2001. El “Lapidario” de Alfonso X El Sabio. *Boletín de la Real Sociedad Española de Historia Natural. Sección geológica*, **1961**, 59, 131-155.

Amorós, José Luis, 1920-2001. La colección del caballero Francisco Dávila y el origen del Real Gabinete de Historia Natural. *Boletín de la Real Sociedad Española de Historia Natural. Sección geológica*, **1963**, 61, 9-37.

Amorós, José Luis, 1920-2001. La mineralogía española en la época del Barroco: Alonso Barba. *Boletín de la Real Sociedad Española de Historia Natural. Sección geológica*, **1963**, 61, 167-186.

Ångström, Anders Jonas, 1814-1874. Über die Molecular Constanten der monoklinoëdrischen Krystalle. *Annalen der Physik*, **1852**, 86, 206-237.

Arago, François, 1786-1853. Sur une modification remarquable qu'éprouvent les rayons lumineux dans leur passage à travers certain corps diaphanes, et sur quelques autres nouveaux phénomènes d'optique. *Mémoires de la Classe des sciences mathématiques et physiques de l'Institut national de France*, **1811**¹, 93-134.

Arago, François, 1786-1853. *Biographies of distinguished scientific men*. Traducido del francés por W.H. Smyth, B. Powell and R. Grant. London: Longman. **1857**. VIII, 607 p., il., diagr., 22.5 cm. Notas: Incluye "The history of my youth: an autobiography".

Arzruni, Andreás, 1847-1898. *Physikalische Chemie der Krystalle*. Braunschweig Druck: Verlag von Friedrich Vieweg und Sohn. **1893**. X, [i], 365 p., 22 cm. Incluye: índice y notas bibliográficas al pie.

Bachelard, Gaston, 1884-1962. *Étude sur l'évolution d'un problème de physique*. Paris: J. Vrin. **1927**. 182, [2] p. diagr., 25 cm.

¹ Publicado en 1812

Barlow, William, 1845-1934. *A mechanical cause of homogeneity of structure and symmetry geometrically investigated: with special application to crystals and to chemical combination*. Dublin: Royal Dublin Society. **1897**. 527-690. 22 cm. Scientific proceedings of the Royal Dublin Society Ns, v.8 (6), no.62.

Bartholinus, Erasmus, 1625-1698. *Experimenta crystalli islandici disdiaclastici*. English & Latin Experiments on birefringent Icelandic crystal. Traducido por Thomas Archibald; Introducción de Jed Z. Buchwald y Kurt Møller Pedersen con un facsímil de la publicación original de 1669-1670. Copenhagen: Danish National Library of Science and Medicine. **1991**. 62, 60 p., il., 24 cm.

Bartholinus, Erasmus, 1625-1698. *De figura nivis dissertatio*. Hafniae: Sumptibus P. Hauboldi. **1661**.

Bartholinus, Erasmus, 1625-1698. An accompt of sundry experiments made and communicated by that learn'd mathematician, Dr. Erasmus Bartholinus, upon a crystal-like body, sent to him out of Island. *Philosophical transactions*, **1670**, 5, 2039-2048.

Bartholin, Thomas, 1616-1680. *Thomae Bartholini De nivis usu medico observationes variae*: Accessit D. Erasmi Bartholini *De figura nivis dissertatio*; cum operum authoris catalogo.

Hafniae Typis Matthiae Godicchii, sumptibus Petri Haubold, bibl. **1661**. [24], 232, [8]; [6], 42; [16] p., [1]. Lám., il., 15 cm. (8vo.).

Basilio, Santo, Obispo de Cesarea, ca. 329-379. *Exegetic homilies*. Traducido por Agnes Clare Way. Washington: Catholic University of America Press. **1963**. XVI, 378 p. 22 cm.

Bell, Arthur Ernest, 1926-2006. *Christian Huygens and the development of science in the seventeenth century*. London: E. Arnold. **1947**. 220 p., pl., port., diagr. 23 cm.

Bentley, Wilson Alwyn, 1865-1931 y Humphreys, William Jackson, 1862-1949. *Snow crystals*. New York: Dover Publications. **1962**. 226 p. (il.) port. 26 cm.

Bernhardi, Johan Jacob, 1774-1850. Darstellung einer neuen Methode, Kristalle zu beschreiben. *Gehlen's Journal. Journal für die Chemie, Physik und Mineralogie*, **1808**, 5, 157-198.

Bergman, Tobern, 1735-1784. *Variae crystallorum formae, a Spato ortae. Nova acta Regiae societatis scientiarum Upsaliensis*, **1773**, 1, 150-155.

Bergman, Tobern, 1735-1784. *Commentatio de tubo ferruminatorio ejusdemque usu in explorandis corporibus*

præsertim mineralibus. Vindobonæ: Kraus[s.n.]. **1779**. *Acta Societatis Literariae Bohemicae*, 4 p, cm. (8vo).

Bergman, Tobern, 1735-1784. *Meditationes de Systemate Fossilium Naturali. Nova acta Regiae societatis scientiarum Upsaliensis*, **1784**, 4, 63-128.

Bergman, Tobern, 1735-1784. *Physical and chemical essays*. Traducido y revisado (con notas e ilustraciones añadidas) del latín original por Edmund Cullen. London: J. Murray. **1784**. 2 v., 6 il. (pleg.), 22 cm. (8vo.)

Bergman, Tobern, 1735-1784. De la forme des cristaux et principalement de ceux qui viennent du spath (traducido por M. de Morveaux). *Journal de physique*, **1792**, 40, 258-270.

Beudant, François-Sulpice, 1787-1850. De la cristallotechnie ou Essai sur les phénomènes de la cristallisation. *Journal de physique*, **1802**, 55, 295-345.

Beudant, François-Sulpice, 1787-1850. Recherches sur les causes qui peuvent faire varier les formes cristallines d'une même substance minérale. *Annales de chimie et de physique*, **1818**, 8, 5-52.

Beudant, François-Sulpice, 1787-1850. Lettre de M. Beudant a M. Gay-Lussac, sur la Mémoire de M. Mitscherlich. *Annales de chimie et de physique*, **1820**, 14, 326-335.

Biot, Jean-Baptiste, 1774-1862. Mémoire sur la propagation de la chaleur, et sur un moyen simple et exact de mesurer les hautes températures. *Journal des mines*, **1804**, 17, 203-224.

Biot, Jean-Baptiste, 1774-1862. Sur des nouveaux rapoorts qui existent entre la réflexion et la polarization de la lumière par les corps cristallisés. *Mémoires de la Classe des sciences mathématiques et physiques de l'Institut national de France*, **1811** (1812), 135-280.

Biot, Jean-Baptiste, 1774-1862. Mémoire sur un nouveau genre d'oscillations que les molécules de la lumière éprouvent en traversant certains cristaux. *Mémoires de la Classe des sciences mathématiques et physiques de l'Institut national de France*, **1812** (1814), 1-371.

Biot, Jean-Baptiste, 1774-1862. Observations sur la nature des forces qui partagent les rayons lumineux dans les cristaux doués de la double réfraction. *Mémoires de la Classe des sciences mathématiques et physiques de l'Institut national de France*, **1818** (1813-1815), 221-234.

Biot, Jean-Baptiste, 1774-1862. *Recherches expérimentales et mathématiques sur les mouvements des molécules de la lumière autour de leur centre de gravité* (1.ptie.). Paris: Firmin Didot. **1814**. LXXVIII, 523 p., il., 27 cm.

Biot, Jean-Baptiste, 1774-1862. *Traité de physique expérimentale et mathématique*. Paris. **1816**. 4 vol.: il., 21 pl., 8vo.

Biringuccio, Vannoccio, 1480-1539. *De la pirotechnia*. Libri. x. dove ampiamente si tratta non solo di ogni sorte & diuersita di miniere, ma anchora quanto si ricerca intorno à la prattica di quelle cose di quel che si appartiene à l'arte de la fusione ouer gitto de metalli come d'ogni altra cosa simile à questa. Composti per il s. Vanoccio Biringuccio Sennese. Con priuilegio apostolico & de la Cesarea Maesta & del illustriss. Senato veneto. [Veneto]. **1540**. 8 p. 1., 168 numb. 1. Il., 22 cm.

Biringuccio, Vannoccio, 1480-1539. *De la pirotechnia*. Traducción al inglés: *The pirotechnia*. 1st M.I.T. Press pbk. ed. Cambridge: M.I.T. Press. **1966**. XXVI, [4], 477 p., il., fasc., 21 cm.

Boškovic, Ruder Josip, 1711-1787. *A theory of natural philosophy*. Traducción inglesa de la 1ª Edición por J.M. Child. 1763. Nueva Ed. Cambridge MA: M.I.T. Press. **1966**. XXI, 229 p., il., 24 cm.

Boyle, Robert, 1627-1691. *An essay about the origine and virtues of gems*. Con introducción de Arthur F. Hagner y

prefacio de George W. White. New York: Hafner Pub. Co. **1972**. XXVII, 185 p., 24 cm.

Boyle, Robert, 1627-1691. *The Sceptical Chymist o Chymico-physical Doubts & Paradoxes, touching the spagyrist's principles commonly called hypostatical, as they are wont to be propos'd and defended by the generality of alchymist*. London: J. Cadwell para J. Crooke. **1661**.

Boyle, Robert, 1627-1691. *The works of the Honourable Robert Boyle*. London: A. Millar. **1744**. 5 v., il., port., fol.

Bravais, Auguste, 1811-1863. Sur les polyèdres symétriques de la géometrie. *Journal de mathématiques pures et appliquées*, **1849**, 14, 137-140.

Bravais, Auguste, 1811-1863. Mémoire sur les polyèdres de forme symétrique. *Journal de mathématiques pures et appliquées*, **1849**, 14, p. 141-180.

Bravais, Auguste, 1811-1863. *On the systems formed by points regularly distributed on a plane or in space*. Traducido por Amos J. Shaler. Irvington-on-Hudson: Crystallographic Society of America. 1949. VIII, 113 p. Memoir Crystallographic Society of America no.1. Notas: Traducción de Mémoire sur les systèmes formés par des point distribués régulièrement

sur un plan ou dans l'espace. *Journal de l'École polytechnique*. Paris, **1850**, 1-128.

Bravais, Auguste, 1811-1863. Études cristallographiques. *Journal de l'École polytechnique*, **1851**, 20, 101-276.

Breton, Philippe-Auguste, ca. 1843. Théorie géométrique des centres multiples. *Journal de mathématiques pures et appliquées*, **1845**, 10, 430-434.

Brewster, David, 1781-1868. On the laws of polarization and double refraction in regularly crystallized bodies. *Philosophical transactions of the Royal Society of London*, **1818**, 108, 199-272.

Brewster, David, 1781-1868. *Memoirs of the life, writings, and discoveries of Sir Isaac Newton*. Edinburgh: T. Constable. Hamilton, Adams **1855**. Reeditado con una introducción de Richard S. Westfall y notas bibliográficas. New York: Johnson Reprint Corporation. **1965**. 2 vol., il., port., 22 cm. Sources of Science 14.

Buffon, Leclerc, George-Louis, Conde de, 1707-1788. *Histoire naturelle des minéraux*. Paris. **1783-1788**. 6 vol., il., mapas, lám., (muchas pleg.), 17 cm.

Burmester, Ludwig, 1840-1927. Geschichtliche Entwicklung des kristallographischen Zeichnens und dessen Ausführung in schräger Projektion. *Zeitschrift für Kristallographie*, **1922**, 57, 1-47.

Cappeller, Moritz Anton, 1685-1769. *Prodromus crystallographiae de crystallis improprie sic dictis commentarium*. Lucerne: Henrici Rennvvardi Wyssing. **1723**. Traducción alemana por Karl Mieleithner. Munich. **1922**. VIII, 39, 47 p., 3 pl., 8°.

Carangeot, Arnould, 1742- 1806. Goniomètre, ou mesure-angle. *Journal de physique*, **1783**, 22, 193-197.

Charleton, Walter, 1619-1707. *Physiologia Epicuro-Gassendo-Charltoniana or A fabrick of science natural upon the hypothesis of atoms, founded by Epicurus, repaired by Petrus Gassendus, augmented by Walter Charleton*. London: T. Heath. **1654**. Reeditado con índices y una nueva introducción. New York & London: Johnson Reprint. **1966**. XXV, 491p. Sources of Science 31.

Chaskolskaia, Marianna Petrovna, ca. 1959. *Les Cristaux*. Moscow: Editions en langues etrangers. **1959**. 290 p., [1] h., il., 21 cm.

Curie, Pierre, 1859-1906. Sur les questions d'ordre: répétitions. *Bulletin de la Société minéralogique de France*, **1884**, 7, 89-111.

Curie, Pierre, 1859-1906. Sur la symétrie. *Bulletin de la Société minéralogique de France*, **1884**, 7, 418-457.

Cuvier, Georges, Barón de, 1769-1832. Éloge historique de M. Haüy, prononcé dans la séance publique de l'Académie royal de sciences, le 2 de juin 1823. *Mémoires de l'Académie royal des sciences*, **1829**, VIII, 154-178.

Dalton, John, 1766-1844. *A new system of chemical philosophy*. London: S. Russell, **1808-1827**. 2 vol., 8 pl., tablas, 22 cm.

Daniell, John Frederic, 1790-1845. On a new register-pyrometer, for measuring the expansions of solids, and determining the higher degrees of temperature upon the common thermometric scale. *Philosophical transactions of the Royal Society of London*, **1830**, 120, 257-286.

Daumas, Maurice, 1910-1984. *Histoire de la science*. Paris: Gallimard. **1957**. XLVIII, 1904 p., il., maps, diagr., tablas; 18 cm. Encyclopédie de la Pléiade, 5.

Davidson, William, 1593-1669. *Philosophia pyrotechnica*. Paris: Apud Ioannem Bessin, **1640**. 4 pt., pl., 8°.

Dejussieu, Laurent-Pierre, 1792-1866. Sur le fer sulfuré blanc. *Journal des mines*, **1811**, 30, 241-253.

Delafosse, Gabriel, 1796-1878. Recherches relatives à la cristallisation, considérée sous les rapports physiques et mathématiques. 1er. partie. *Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des sciences*, **1841**, 11, 394-400.

Des Cloizeaux, Alfred, 1817-1897. *Leçons de Cristallographie: professées à l'école normale*. Paris. **1861**. 100 p., il., 4°.

Descartes, René, 1596-1650. *Oeuvres de Descartes*. Publicado por Charles Adam & Paul Tannery. Paris: J. Vrin. **1956-1957**. 12 vol., il., 28 cm.

Descartes, René, 1596-1650. *Discours de la methode pour bien conduire sa raison, & chercher la verité dans les sciences. Plus La dioptrique. Les meteores. Et La geometrie. Qui sont des essais de cete methode*. Leyde: I. Maire. **1637**. 78 p., 1 l., 413, [34] p. il., diag., 21 cm.

Dioscòrides Pedanio, 40-90. *De Materia Medica*. **ca. 512**. *The Greek herbal of Dioscorides*. Traducido al inglés por John

Goodyer. **ca. 1655**. New York: Hafner. **1959**. IX, 701 p., il., 22 cm

Duhamel, Jean Marie Constant, 1797-1872. Sur les équations générales de la propagation de la chaleur dans les corps solides dont la conductibilité n'est pas la même dans tous les sens. *Journal de l'École polytechnique*, **1832**, 13, 356-399.

Duhamel, Jean Marie Constant, 1797-1872. Note sur les surfaces isothermes dans les corps solides dont la conductibilité n'est pas la même dans tous les sens. *Journal de mathématiques pures et appliqués*, **1839**, 4, 63-78.

Duhamel, Jean Marie Constant, 1797-1872. Mémoire sur la propagation de la chaleur dans les cristaux. *Journal de l'École polytechnique*, **1848**, 19, 155-188.

Dulong, Pierre Louis, 1785-1838 y Petit, Alexis Thérèse, 1791-1820. Sur la mesure des températures et sur les lois de la communication de la chaleur. *Annales de chimie et de physique*, **1817**, 7, 113-154.

Dürer, Albrecht, 1471-1528. Underweysung der Messung, mit dem Zirckel und Richtscheyt, in Linien, Ebenen unnd gantzen Corporen. Nürnberg: Gedruckt durch H. Formschneyder [i.e. Hieronymum Andreae]. **1538**. [187] p., il., 32 cm.

Epifanius, Santo, Obispo de Constancia, c.a. 310-403. *De gemmis*. London: Christophers. **1934**. 3 p., l., cxxiii, 335, 51 p. diagr., 24 cm.

Euler, Leonhard, 1707-1783. *Introductio in analysin infinitorum*. Lausannae: M. M. Bousquet, **1748**. 2 vol., diagr., 28 cm. Reeditado en *Opera Omnia*, Orell Füssli (1921-68), (1), 9.

Fedorov, Evgraf Stepanovich, 1853-1919. *Symmetrie der regelmässigen Systeme von Figuren. Verhandlungen der Russisch-Kaiserlichen Mineralogischen Gesellschaft zu St. Petersburg*, **1891**, 2 (28), 1-145.

Fedorov, Evgraf Stepanovich, 1853-1919. *Symmetry of crystals. Zeitschrift für Krystallographie und Mineralogie*, **1893**, 21, 679-?.

Fedorov, Evgraf Stepanovich, 1853-1919. *Symmetry of crystals*. Traducido del ruso por David y Katherine Harker. New York: American Crystallographic Association. **1971**. X, 315 p., il., 29 cm. ACA monograph n° 7.

Fizeau, Hippolyte, 1819-1896. *Mémoire sur la dilatation des corps solides par la chaleur. Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des sciences*, **1866**, 62, 1101-1106.

Fizeau, Hippolyte, 1819-1896. Recherches sur la dilatation et la double refraction du cristal de roche échauffé. *Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des sciences*, **1864**, 58, 923-932.

Fizeau, Hippolyte, 1819-1896. Mémoire sur la dilatation des corps solides par la chaleur. Deuxième partie. *Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des sciences*, **1866**, 62, 1113-1148.

Fletcher, Lazarus, Sir, 1854-1921. Über die Ausdehnung der Kristalle durch die Wärme. *Zeitschrift für Krystallographie und Mineralogie*, **1880**, 4, 337-352.

Fourier, Jean Baptiste Joseph, Barón de, 1768-1830. Théorie du mouvement de la chaleur dans les corps solides (1 lám.). *Mémoires de l'Académie des sciences de l'Institut de France*, **1824**, 4, 185-556.

Fourier, Jean Baptiste Joseph, Barón de, 1768-1830. Suite du Mémoire intitulé “Théorie du mouvement de la chaleur dans les corps solides” (1 lám.). *Mémoires de l'Académie des sciences de l'Institut de France*, **1826**, 5, 153-246.

Fourier, Jean Baptiste Joseph, Barón de, 1768-1830. *Oeuvres de Fourier*: Paris: Gauthier-Villars et fils. **1888-1890**. 2 vol., diag., 28 x 23 cm.

Frankenheim, Moritz Ludwig, 1801-1869. Einige Sätze aus der Geometrie der geraden Linien. *Journal für die reine und angewandte Mathematik*, **1832**, 8, 178-186.

Frankenheim, Moritz Ludwig, 1801-1869. *Die Lehre von der Cohäsion: umfassend die Elasticität der Gase, die Elasticität und Cohärenz der flussigen und festen Körper und die Krystallkunde*. Bratislava: August Schultz und Comp. **1835**. VI, 502 p., 22 cm.

Frankenheim, Moritz Ludwig, 1801-1869. System der Krystalle; ein Versuch. *Nova Acta Acad. Nat. Cur.*, **1842**, 19 (2), 469-659.

Fresnel, Augustin Jean, 1788-1827. *Oeuvres complètes*. Paris: Imprimerie impériale. **1866-1870**. 3 vol.; il., (port., pl., diag.), 28 cm. Notas: Incluye referencias bibliográficas. Contenidos: Tomo 1-2: Théorie de la lumière, Tomo 3: Phares et appareils d'éclairage.

Galilei, Galileo, 1564-1642. *Dialogues concerning two new sciences*. Traducido por Henry Crew y Alfonso de Salvio con introducción de Antonio Favaro. New York: Dover. **1914**².

² New York: Dover Publications. **1954**. XXI, 300 p., il., 21 cm

Gassendi, Pierre, 1592-1655. *Opera omnia*. Florencia: Typis Regiae Celsitudinis apud Joannem Caietanum Tartini [et] Sanctem Franchi. **1727**. 6 vol., Fol. Contiene: vols. 1-2. Syntagma philosophicum, vol. 3. Philosophica opuscula, vol. 4. Opera astronomica, vol. 5. Opera humaniora ac miscellanea, vol. 6. Epistolae et responsa auctoris ad varios & variorum ad ipsum ab anno 1621 ad annum 1655.

Gassendi, Pierre, 1592-1655. *De vita et moribus Epicuri libri octo*. Lyon: Apud Guillelmum Barbier. **1647**³.

Gassendi, Pierre, 1592-1655. *Animadversiones in decimum librum Diogenis Laertii, qui est de vita, moribus, placitisque Epicuri*. Lyon: [s.n.]. **1649**. 3[2] vol.

Gauss, Carl Friedrich, 1777-1855. Recension der “Untersuchungen über die Eigenschaften der positiven ternären quadratischen Formen, Von Ludwig August Seeber”. *Journal für die reine und angewandte Mathematik*, **1840**, 20, 312-320.

Gilbert, William, 1544-1603. *De magnete: magneticisque corporibus, et de magno magnete tellure; physiologia noua, plurimis & argumentis, & experimentis demonstrata*. Londres: Excudebat Petrus Short. **1600**. [16], 240 p., [1] il., diagr., (xil.),

³ Amsterdam: Rodopi. **1968**. 248 p., 22 cm.

30 cm. New York: Basic Books. **1958**. XI, facs. (246, iv, 67 p. il., diagr.), 30 cm.

Grailich, Joseph, 1829-1859 y Lange, Viktor von, 1838-1921. *Untersuchungen über die physicalischen Verhältnisse krystallisirter Körper*. Viena: aus der Kaiserlich-königlichen Hof- und Staatsdruckerei, in Commission bei Karl Gerold's Sohn. **1858-1859**. Varias p., [12] pleg., lám., il., 24 cm.

Haüy, René Just, 1743-1822. Extrait d'une mémoire sur la structure des cristaux de grenat. *Journal de physique*⁴, **1782**, 19, 366-370.

Haüy, René Just, 1743-1822. Extrait d'une mémoire sur la structure des spaths calcaire. *Journal de physique*, **1782**, 20, 33-39.

Haüy, René Just, 1743-1822. *Essai d'une théorie sur la structure des cristaux, appliquée à plusieurs genres de substances cristallisées*. Paris: Chez Gogué & Née de la Rochelle. **1784**. 8, 236 p., 21 cm.

⁴ “Journal de physique”, es una variante de título de la revista cuyo título principal es: “Observations sur la physique, sur l'histoire naturelle et sur les arts”, ISSN 1770-6475, activa desde 1771 hasta 1793.

Haüy, René Just, 1743-1822. Leçons sur la physique. Séances des Écoles normales recueillies par des sténographes et revues par les professeurs. [Leçons]. **1800**, 1, 309-310.

Haüy, René Just, 1743-1822. *Traité de minéralogie*. Paris: Conseil des Mines. **1801**. 4 vol., atlas con 86 lám., il., 21x13 cm.

Haüy, René Just, 1743-1822. Comparaison des formes cristallines de la strontiane carbonatée avec celles de l'aragonite. *Annales de chimie et de physique*, **1817**, 5, 439-441.

Haüy, René Just, 1743-1822. *Traité de cristallographie, suivi d'une application des principes de cette science à la détermination des espèces minérales, et d'une nouvelle méthode pour mettre les formes cristallines en projection*. Paris: Bachelier & Huzard. **1822**. 2 vol. [y] atlas. 20x24 cm.

Herschel, John Frederick William, Sir, 1792-1871. On the action of crystallized bodies on homogeneous light, and on the causes of the deviation from Newton's scale in the tints which many of them develop on exposure to a polarized ray. *Philosophical transactions of the Royal Society of London*, **1820**, 110, 45-100.

Hessel, Johann Friedrich Christian, 1796-1872. Krystallometrie, oder Krystallonomie und Krystallographie⁵. *Ostwald's Klassiker der exakten Wissenschaften*, **1897**, 88-89.

Hire, Philippe de la, 1640-1718. Memoires de mathematique et de physique, contenant un traité des epicycloïdes, & de leurs usages dans les mechaniques. L'explication des principaux effets de la glace & du froid. Une dissertation des differences des sons de la corde de la trompette marine. Un traité des differens accidents de la vûe, divisé en deux parties. Paris: De l'Imprimerie royale. **1694**. 4 p., l., 302 (i.e. 202) p., 1 l. il., diagr., 24x18 cm.

Hire, Philippe de la, 1640-1718. Histoire de l'Academie royale des sciences. *Mémoires de l'Académie royale des sciences*, **1710**, 121.

Hooke, Robert, 1635-1703. *Micrographia or Some physiological descriptions of minute bodies made by magnifying glasses. With observations and inquiries thereupon*. London: J. Martyn y J. Allestry. **1665**. 18 p., l., 246, [10] p. XXXVIII pl., 31 cm.

⁵ Apareció cómo el artículo "Krystall" en *Gehler's Physikalisches Wörterbuch*, **1830**.

Hooykaas, Reijer, 1906-1994. Torbern Bergman's crystal theory. *Lychnos* (Annual of Swedish History os Science Society), **1952**, 21-54.

Huygens, Christiaan, 1629-1695. *Oeuvres complètes*. La Haya: Martinus Nijhoff. **1888-1950**. 23 vol., 29 cm.

Huygens, Christiaan, 1629-1695. *Traite de la lumière où sont expliquées les causes de ce qui luy arrive dans la reflexion & dans la refraction, et particulierement dans l'etrange refraction du cristal d'islande par C.H.D.Z.; avec Un discours de la cause de la pesanteur*. Leiden: Pieter Van Der Aa. **1690**. [8], 124, [2], 125-128, [2], 129-180 p., il., (xil.), 21 cm. (4to)

Isidoro, Santo, Arzobispo de Sevilla, 556-636. *Isidori Hispalensis episcopi Etymologiarum sive originum libri XX*. *Recognovit brevique adnotatione critica instruxit*. Oxford: Clarendon Press. **1962**. Contenido: 1: Libri I-X. 2: Libri XI-XX. Reimpresión de la edición de 1911.

Jannettaz, Édouard, 1832-1899. Sur la propagation de la chaleur dans les corps cristallisés. *Annales de chimie et de physique*, **1873**, 4 (29), 5-82, lám. I, II.

Jordan, Marie Ennemond Camille, 1838-1922. Mémoire sur les groupes de mouvements. *Annali di matematica pura ed applicata*, **1869**, 2 (11), 167-215.

Jordan, Marie Ennemond Camille, 1838-1922. Mémoire sur les groupes de mouvements (continuazione e fine). *Annali di matematica pura ed applicata*, **1869**, 2 (11), 322-345.

Jordan, Marie Ennemond Camille, 1838-1922. *Traité des substitutions et des équations algébriques*. Paris: Gauthier-Villars. **1870**. XVIII, 667 p. 29 cm.

Kepler, Johannes, 1571-1630. *Strena seu de nive sexángula*. Frankfurt: Tambach, Gottfried. **1611**.

Kupfer, Adol'f Yakovlevich, 1799-1865. *Handbuch der rechnenden Krystallonomie*. San Petersburgo: K. Akad. der Wissenschaften. **1831**. VIII, 591 p., 14 lám., 28 cm.

Lamé, Gabriel, 1795-1870. *Examen des différentes méthodes employées pour résoudre les problèmes de géométrie*. Paris: Mme. Ve. Courcier. **1818**. 124p., 2 lám., il., ecuaciones, 20cm. (8vo).

Lamé, Gabriel, 1795-1870. Mémoire sur les surfaces isothermes dans les corps solides en équilibre de

température. *Annales de chimie et de physique*, **1833**, 53 (2), 190-204.

Lamé, Gabriel, 1795-1870. Mémoire. Sur la propagation de la chaleur dans les polyèdres, et principalement dans le prisme triangulaire régulier. *Journal de l'École polytechnique*, **1833**, 14, 194-251.

Lamé, Gabriel, 1795-1870. *Leçons sur la théorie analytique de la chaleur*. Paris: Mallet-Bachelier. **1861**. XXXI, 414 p., 23 cm.

Lavoisier, Antoine Laurent, 1743-1794. *Traité élémentaire de chimie: présenté dans un ordre nouveau et d'après les découvertes modernes*. Paris: Chez Cuchet (De l'Imprimerie de Chardon). **1789**. 2 vol. (XLIV, 322, VIII, 323-653, (3) p., XIII, lám., tablas, 20 cm. (8vo).

Lavoisier, Antoine Laurent, 1743-1794 y Laplace, Pierre Simon, Marquis de, 1749-1827. Mémoire sur la chaleur. *Mémoires de l'Académie des sciences*, **1780**⁶, 283-333.

⁶ Mémoire sur la chaleur. Paris: Gauthier-Villars et cie. **1920**. 78 p, II pl., 18 cm. Les maîtres de la pensée scientifique; collection de mémoires pub. par les soins de M. Solovine.

Leblanc, Nicolas, 1742-1806. Essai sur quelques phénomènes relatifs à la cristallisation de sels neutres. *Journal de physique*, **1786**, 28, 341-345.

Leeuwenhoek, Antoni van, 1632-1723. *The collected letters of Antoni van Leeuwenhoek*. Editado, ilustrado y anotado por un comité de científicos holandeses. Amsterdam: Swets & Zeitlinger. **1939**. 12 vol., V, il., 30 cm. Contenido: vol.1. 1673-76, vol. 2. 1676-79, vol. 3. 1679-82, vol. 4. 1683-84, vol. 5. 1685-86, vol. 6. 1686-87, vol. 7. 1687-88, vol. 8. 1688-92, vol. 9. 1692-94, vol. 10. 1694-95, vol. 11. 1695-96, vol. 12. 1696-1699.

Lejeune Dirichlet, Peter Gustav, 1805-1859. Über die Reduction der positiven quadratischen Formen mit drei unbestimmten ganzen Zahlen. *Journal für die reine und angewandte Mathematik*, **1850**, 40, 209-227.

Lévy, Armand, 1794-1841. *Description d'une collection de minéraux formée par M. Henri Heuland*. London: Adolphe Richter et Compagnie. **1837**. 3 vol., 22 cm, Atlas 83 p., 34x26 cm.

Linné, Carl von, 1707-1778. *Amoenitates academicae Caroli Linnæi*. Lyon: Cornelium Haak, **1749-1790**. 10 vol., 57 p., pl., tablas, 21 cm.

Linné, Carl von, 1707-1778. *Specimen academicum de crystallorum generatione*. Upsala. **1747**. 4 p., 1 lám, 30, [2] p., pl., 19 cm.

Linné, Carl von, 1707-1778. *Systema naturæ, sive Regna tria naturæ systematice proposita per classes, ordines, genera, et species*. Lyon: Theodorum Haak. **1735**. 30, [13] p., 55 cm. fol., 3 vol. [in 4], il., 21 cm.

Lomonosov, Mikhail Vasil'evich, 1711–1765. *On the solidity and liquidity of bodies*. San Peteburgo: Academia de Ciencias. **1760**. Traducido al inglés por Mikhail Vasil'evich. Cambridge: MA. **1970**.

Mairan, Jean-Jacques Dortous de, 1678-1771. *Dissertation sur la glace ou Explication physique de la formation de la glace & de ses divers phénomènes*. Paris: Imprimerie royale. **1749**. XXIX, [10], 384, XX p., 4 pl., diagr., 18 cm.

Malus, Étienne Louis, 1775-1812. Sur une propriété de la lumière réfléchie para les corps diaphanes. *Nouveau bulletin des sciences*, **1807-1809**, 266-269.

Malus, Étienne Louis, 1775-1812. Sur les phènomenes qui dependent des formes de molécules de la lumière. *Nouveau bulletin des sciences*, **1807-1809**, 341-344.

Malus, Étienne Louis, 1775-1812. Sur les phénomenes qui dependent des formes de molécules de la lumière. *Nouveau bulletin des sciences*, **1807-1809**, 353-355.

Mieleitner, Kärl, 1890-1923. Die Anfänge der Theorien über die Struktur der Kristalle. Domenico Guglielmini, «Philosophische Betrachtungen, abgeleitet von der Formen der Salze». *Fortschritte der Mineralogie, Kristallographie und Petrographie*, **1923**, 8, 199-234.

Miller, William Hallowes, 1801-1880. *A treatise on crystallography*. Cambridge: Pitt Press. **1839**. Landmarks of science. VII, [1], 139 p., 10 lám., il., 21 cm.

Mitscherlich, Eilhard, 1794-1863. Sur la rélation qui existe entre les proportions chimiques et la forme cristalline. *Annales de chimie et de physique*, **1820**, 14, 172-190.

Mitscherlich, Eilhard, 1794-1863. Réflexions sur la Mémoire de M. Mitscherlich concernant l'identité de la forme cristalline dans plusieurs substances différentes. *Annales de chimie et de physique*, **1820**, 14, 305-308.

Mitscherlich, Eilhard, 1794-1863. Sur la rélation qui existe entre la forme cristalline et les proportions chimiques. 2e Mémoire sur les arsénates et les phosphates. *Annales de chimie et de physique*, **1821**, 19, 350-419.

Mitscherlich, Eilhard, 1794-1863. *Über das verhältniss der krystallform zu den chemischen proportionen*. Abhandlungen der Könighchen Akademie der Wissenschaften, **1822-1823**, 43-48.

Mitscherlich, Eilhard, 1794-1863. *Über das Verhältniss der Form der krystallisirten Körper zur Ausdehnung durch die Wärme*. *Annalen der Physik*, **1824**, 1 (2), 125-127.

Mitscherlich, Eilhard, 1794-1863. *Über die Ausdehnung der krystallisirten Körper durch die Wärme*. *Annalen der Physik*, **1827**, 10 (2), 137-152.

Mitscherlich, Eilhard, 1794-1863. *Sur les formes cristallines et la composition des sulfates, des sélénates et des chromates*. *Annales de chimie et de physique*, **1828**, 38, 54-56.

Mitscherlich, Eilhard, 1794-1863. *Note de M. Mitscherlich*. *Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des sciences*, **1844**, 19, 720-725.

Möbius, August Ferdinand, 1790-1868. *Über das Gesetz der Symmetrie der Krystalle und die Anwendung dieses Gesetzes auf die Eintheilung der Krystalle in Systeme*. *Berichte über die Verhandlungen der Königlich Sächsischen Gesellschaft der Wissenschaften zu Leipzig. Mathematisch-Physische Klasse*, **1849**, 1, 65-75.

Mohs, Friedrich, 1773-1839. *Die charaktere der Klassen, Ordnungen, Geschlechter und Arten, oder, die charakteristik des naturhistorischen Mineral-Systemes.* Dresden: Arnoldischen Buchhandlung. **1820.** XXVI, 100 p., 21 cm.

Naumann, Carl Friedrich, 1797-1873. *De hexagonalis crystallinarum formarum systemate.* Leipzig: Ex officina Glubckii. **1825.** Contenido: Pars prior. Dissertatio - pars altera. Commentario. 81 p., 1 lám. pleg., 21cm.

Naumann, Carl Friedrich, 1797-1873. *Grundriss der Krystallographie.* Leipzig: Johann Ambrosius Barth. **1826.** XXIV, 408 p., 3 lám., 21cm.

Neumann, Carl Gottfried, 1832-1925. *Über die thermischen Axen der Krystalle des ein- und eingliedrigen Systems.* *Annalen der Physik*, **1861**, 114, 492-504.

Neumann, Franz Ernst, 1798-1895. *Beiträge zur Krystallonomie Hft.1.* Berlin: Posen. **1823.** XVI, 152 p., 12 pl., 8°.

Neumann, Franz Ernst, 1798-1895. *De lege zonarum principio evolutionis systematum crystallinorum: pars prior, Dissertatio inauguralis.* Berolini. **1826.** 24 p. 4°.

Neumann, Franz Ernst, 1798-1895. Auszug eines Schreibens des Herrn Prof. Neumann an Prof. Weiss. *Annalen der Physik*, **1832**, 24 (2), 390-392.

Neumann, Franz Ernst, 1798-1895. Theorie der doppelten Strahlenbrechung, abgeleitet aus den Gleichungen der Mechanik. *Annalen der Physik*, **1832**, 25 (2), 418-454.

Neumann, Franz Ernst, 1798-1895. Die thermischen, optischen und krystallographischen Axen des Krystallsystems des Gypses. *Annalen der Physik*, **1833**, 103 (2), 240-274.

Newton, Isaac, Sir, 1642-1727. *Opticks or a treatise of the reflections, refractions, inflections and colours of light*. 4th ed. London: W. Innys. **1730**. Reimpresión de la 4ª ed. con prólogo de Albert Einstein e introducción de E.T. Whittaker. London: G. Bell & Sons, Ltd. **1931**. XXVIII, [2], 414 p., diag., 18 cm.

Oresme, Nicole, ca. 1322-1382. *Le livre du ciel et du monde*. Madison: University of Wisconsin Press. **1968**. XIII, 778 p., il., 25 cm.

Palissy, Bernard, 1510-1590. *Discours admirables*. Traducido por Aurèle La Rocque. Urbana: University of Illinois Press. **1957**. VI, 264 p., 24 cm.

Partington, James Riddick, 1886-1965. *A history of chemistry*. London: Macmillan; New York: St. Martin's Press. **1961-1970**. 4 vol., il., port., 26 cm.

Pasteur, Louis, 1822-1895. *Oeuvres de Pasteur*. Paris: Masson. **1922-1939**. 7 vol., il., retr., 26 cm. Contenido: vol.1. Dissymétrie moléculaire.1922; vol.2. Fermentations et générations dites spontanées, 1922; vol.3. Études sur le vinaigre et sur le vin. 1924; vol.4 Études sur la maladie des vers à soie, 1926; vol.5. Études sur la bière, 1928; vol.6. Maladies virulentes, virus-vaccins et prophylaxie de la rage, 1933; vol.7. Mélanges scientifiques et littéraires; Index analytique et synthétique.

Pasteur, Louis, 1822-1895. Recherches sur les relations qui peuvent exister entre la forme cristalline, la composition chimique et le sens de la polarisation rotatoire. *Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des sciences*, **1849**, XXVIII, 477-478.

Pasteur, Louis, 1822-1895. Nouvelles recherches sur les relations qui peuvent exister entre la forme cristalline, la composition chimique et le phénomène de la polarisation rotatoire. *Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des sciences*, **1850**, 31, 480-484.

Pasteur, Louis, 1822-1895. Recherches sur les propriétés spécifiques des deux acides qui composent l'acide racémique. *Annales de chimie et de physique*, **1850**, 28, 56-99.

Pasteur, Louis, 1822-1895. Sur une distinction entre les produits organiques naturels et les produits organiques artificiels. *Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des sciences*, **1875**, 81, 128-130.

Pérez de Vargas, Bernardo, siglo XVI. De re metalica. [1569]. [20], 206, [1] lám., il., (xil.), 15 cm. (8vo).

Pfaff, Friedrich, 1825-1886. Untersuchungen über die Ausdehnung der Krystalle durch die Wärme. *Annalen der Physik*, **1858**, 180 (5), 171-184.

Pfaff, Friedrich, 1825-1886. Untersuchungen über die Ausdehnung der Krystalle durch die Wärme. *Annalen der Physik*, **1859**, 183 (5), 148-154.

Plinio Segundo, Cayo, 24-79 d.C. *Natural history*. Traducido al inglés por H. Rackham , W.H.S. Jones and D.E. Eichholz. Cambridge: Harvard University Press; London: William Heinemann. **1962**. 10 vol., 17 cm.

Poisson, Siméon Denis, 1781-1840. *Théorie mathématique de la chaleur*. Paris: Bachelier. **1835**. 532 p., [1] lám., diagr., 27 cm.

Priestley, Joseph, 1733-1804. *The history and present state of electricity, with original experiments*. Reimpresión a partir de la 3ª ed. London. **1755**. New York: Johnson Reprint Corp. **1966**. 2 vol., il., 23 cm.

Rochot, Bernard, 1900-1971. *Les travaux de Gassendi sur Épicure et sur l'atomisme, 1619-1658*. Paris: J. Vrin. **1944**. XVIII, p. [XI]-XVIII, 212 p., 24 cm.

Romé de L'Isle, Jean Baptiste Louis de, 1736-1790. *Essai de cristallographie ou Description des figures géométriques, propres à differens corps du regne minéral, connus vulgairement sous le nom de cristaux*. Paris: Didot jeune. **1772**. XXXII, 427 [2] p., 7.5"x5".

Romé de L'Isle, Jean Baptiste Louis de, 1736-1790. *Cristallographie ou Description des formes propres à tous les corps du regne minéral*. 2ª ed. Paris: De l'Imprimerie de Monsieur. **1783**. 4 vol., 21 cm. (8 vol.) + 1 vol. lám., (26 cm., 4to).

Rømer, Ole Christensen, 1644-1710. *Démonstration touchant le mouvement de la lumière. Mémoires de l'Académie royale des sciences*, **1730**, 10, 575-577.

Rose, Gustave, 1798-1873. *Eléments de cristallographie*. Paris: Hachette. **1834**. 2 vol., (270, 11 p., 10 h. diag.), 22 cm

Rumford, Benjamin Thompson, Graf von, 1753-1814. An inquiry concerning the source of the heat which is excited by friction. *Philosophical transactions of the Royal Society of London*, **1798**, 88, 80-102.

Scherz, Gustav Felix Karl, ed., 1895-1971. *Dissertations on Steno as geologist*. [Odense]: Odense Universitetsforlag. **1971**. 319 p., il., 26 cm.

Schufle, J. A., ca. 1967. Torbern Bergman, Earth scientist. *Chymia*, **1967**, 12, 58-97.

Seeber, Ludwig August, 1793-1855. Versuch einer Erklärung des inneren Baues der festen Körper. *Gilbert's Annalen der Physik*, **1824**, 76, 229-248.

Seeber, Ludwig August, 1793-1855. *Untersuchungen über die Eigenschaften der positiven ternären quadratischen Formen*. Friburgo: Breisgau. **1831**.

Sénarmont, Henri Hureau de, 1808-1862. Mémoire sur la conductibilité de corps cristallisés par la chaleur. Deuxième mémoire. *Annales de chimie et de physique*, **1848**, 22 (3), 179-211.

Sénarmont, Henri Hureau de, 1808-1862. Deuxième mémoire sur la conductibilité des substances cristallisées pour la chaleur. *Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des sciences*, **1847**, 25, 707-710.

Sénarmont, Henri Hureau de, 1808-1862. Rapport sur une mémoire relatif à la conductibilité des corps cristallisés pour la chaleur. *Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des sciences*, **1847**, 25, 829-843.

Sennert, Daniel, 1572-1637. *Epitome naturalis scientiae*. Witteberg: Impensis Caspari Heiden Bibliopol. **1618**. [14], 644 [20] p., 17 cm.

Socquet, Joseph-Marie, 1769-1839. *Essai sur le calorique ou Recherches sur les causes physiques et chimiques des phénomènes que présentent les corps soumis à l'action du fluide igné: avec des applications nouvelles, relatives à la théorie de la respiration, de la chaleur animale, de l'origine des feux volcaniques, &c.: suivi d'un essai particulier sur les anomalies d'affinités chimiques; d'expériences et d'observations sur le métal des cloches; enfin d'une description de la fameuse aluminière de Souvignaco en Istrie, et des procédés employés pour l'extraction et la purification de l'alun naturel*. Paris: Chez Desray. **1801**. XVI, 473 p., [1], lám., il., 21 cm. (8vo).

Sohncke, Leonhard, 1842-1897. Die regelmässigen ebenen Punktsysteme von unbegrenzter Ausdehnung. *Journal für die reine und angewandte Mathematik*, **1874**, 77, 47-101.

Sohncke, Leonhard, 1842-1897. Entwicklung einer Theorie der Krystallstruktur. Leipzig: Teubner. **1879**. VIII, 247 p., 5 lám., il., 23 cm.

Sohncke, Leonhard, 1842-1897. Die Entdeckung des Eintheilungsprincips der Krystalle durch J.F.C. Hessel. *Zeitschrift für Krystallographie und Mineralogie*⁷, **1891**, 18, 486-498.

Stahl, Georg Ernst, 1660-1734. *Traité des sels, dans lequel on démontre qu'ils sont composés d'une terre subtile, intimement combinée avec de l'eau*. Paris. **1771**. XXIV, 480 p., (12 mo)

Steno, Nicolaus, 1638-1686. *The earliest geological treatise*. **1667**. London: Macmillan & Co. Ltd. **1958**. 51 p., ret., fasc., 22 cm. Notas: Incluye referencias bibliográficas, 46-51.

Steno, Nicolaus, 1638-1686. *The prodromus of Nicolaus Steno's dissertation: concerning a solid body enclosed by process of nature within a solid*. New York,

⁷ Entre 1877 y 1920 esta revista se denominó *Zeitschrift für Krystallographie und Mineralogie* y desde 1921 hasta 2009 pasa a llamarse *Zeitschrift für Krystallographie*.

London: Macmillan. **1916**. New York: Hafner Pub. Co. **1968**. [5], VII, 169-283 p. il., fasc., port., 24 cm.

Swedenborg, Emanuel, 1688-1772. *The principia or The first principles of natural things: to which are added the minor principia*. London: The Swedenborg Society. **1912**. 669 p., 2 vol., il., tablas, diagr. Notas: Traducido del latín por James R. Rendell e Isaiah Tansley con introducción de Isaiah Tansley y prefacio de Sir William F. Barrett.

Teofrasto, ca. 371 a.C. - ca. 287 a.C. *De lapidibus*. Oxford: Clarendon Press. **1965**. VI, 141 p., il., 23 cm.

Thenard, Louis Jacques, Baron de, 1777-1857 y Biot, Jean Baptiste, 1774-1862. *Mémoire sur l'analyse comparée de l'aragonite et du carbonate de chaux rhomboïdal, avec des expériences sur l'action que ces substances exercent sur la lumière. Mèmoires de Physique et de Chimie de la Société d'Arcueil*⁸, **1809**, 2, 176-206. Fasc. New York: Johnson Reprint Corporation. **1967**, vol. II.

Union internationale d'histoire et de philosophie des sciences. *La science au seizième siècle: Colloque International de Royaumont*, 1-4 Juillet 1957. [By Union Internationale

⁸ La Société d'Arcueil fue fundada por C. L. Berthollet.

d'Histoire et de Philosophie des sciences. Paris: Hermann. **1960**.

Vinci, Leonardo da, 1452-1519. *Traité de la peinture, traduit intégralement pour la première fois en français sur le Codex vaticanus (Urbinas) 1270*. Paris: C. Delagrave. **1910**. 2 p., l., 246 p., 1 l. il., pl. 26 cm.

Weiss, Christian Samuel, 1780-1856. *De indagando formarum crystallinarum caractere geometrico principali dissertation*. Lipsiae, **1809**. Traducción al francés en: *Journal des mines*, **1811**, 29 (173), 349-391.

Weiss, Christian Samuel, 1780-1856. Fin du Mémoire sur la détermination du caracteres géométrique principal des formes cristallines. Tradución al francés en: *Journal des mines*, **1811**, 29 (174), 401-444.

Weiss, Christian Samuel, 1780-1856. *Übersichtliche Darstellung der verschiedenen natürlichen Abtheilungen der Krystallisations systeme*. Berlin: Akad. der Wiss. **1815**. 289-336 p., [1] tabla, 28 cm.

Weiss, Christian Samuel, 1780-1856. *Über eine verbesserte Methode für die Bezeichnung der verschiedenen Flächen eines Krystallisations-systemes: nebst Bemerkungen über den*

Zustand von Polarisirung der Seiten in den Linien der krystallinischen Structur. Berlin. **1816-1817**. 286-336 p. 28 cm.

Werner, Abraham Gottlob, 1749-1817. *On the external characters of minerals.* Urbana: University of Illinois Press. **1962**. XXIX, 118 p., port., fasc., 24 cm.

Whewell, Willian, 1794-1866. A general method of calculating the angles made by any planes of crystals, and the laws according to which they are formed. *Philosophical transactions of the Royal Society of London*, **1825**, 115, 87-130.

Wiener, Christian, 1826-1896. *Die Grundzüge der Weltordnung.* Heidelberg. **1863**. XVI, 808 p., 24 cm.

Wilson, Benjamin, 1721-1788. Observations upon some gems similar to the tourmaline. *Philosophical transactions* (1682), **1762**, 52, 443-447.

Wilson, Benjamin, 1721-1788. A letter from Mr. B. Wilson, F.R.S. and Member of the Royal Academy of Sciences at Upsal, to Mr. Aepinus, Professor of Natural Philosophy in the Imperial Academy of Science at St. Petersburg, and member of the Academies of Berlin, Stockholm and Erfurth. *Philosophical transactions* (1682), **1763**, 53, 436-466.

Wollaston, William Hyde, 1766-1828. On the oblique refraction of Iceland crystal. *Philosophical transactions of the Royal Society of London*, **1802**, 92, 381-386.

Wollaston, William Hyde, 1766-1828. A method of examining refractive and dispersive powers, by prismatic reflection. *Philosophical transactions of the Royal Society of London*, **1802**, 92, 365-380.

Wollaston, William Hyde, 1766-1828. Description of a reflective goniometer. *Philosophical transactions of the Royal Society of London*, **1809**, 99, 254-258.

Wollaston, William Hyde, 1766-1828. On the elementary particles of certain crystals. *Philosophical transactions of the Royal Society of London*, **1813**, 2, 51-63.

Young, Thomas, 1773-1829. On the theory of light and colours. *Philosophical transactions of the Royal Society of London*, **1802**, 92, 12-48.

Young, Thomas, 1773-1829. *Miscellaneous works of Thomas Young*. London: Murray. **1855**. 3 vol. Contenidos: vol. 1-2: Scientific memoirs, ed. George Peacock; vol. 3: Hieroglyphical essays, correspondence, etc., ed. John Leitch.



Cubiertas de la primera edición de
“LA GRAN
AVENTURA DEL
CRISTAL”
(1978)